

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJIMOKHTAR-ANNABA
BADJIMOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE
**Département : département génie
mécanique**
Filière : Mécanique
**pécialité : Fabrication Mécanique et
roductique**

Mémoire
**Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Master**
Thème:

**Conception et réalisation d'un broyeur à tambour pour les
matières plastique et son outil**

Présenté par : DIAH Rabah

Encadrant : BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud Prof.UBMA

Jury de Soutenance

MEKHILEF Slimane	M.C.A	UBMA	Président
BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud	Prof.	UBMA	Encadrant
LAOUAR Lakhdar	Prof.	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Je tiens à remercier mon enseignant et promoteur,

Pr. Bouchelaghem Abdelaziz Mahmoud,

pour sa disponibilité, sa précieuse aide,

durant l'exécution de ce travail.

J'en suis très reconnaissant envers tous les professeurs

du Département de Génie Mécanique qui ont contribué

à ma formation, tout au long de mon cursus.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

aux âmes de mes chers parents;

à tous mes camarades...

à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué
à l'élaboration de ce travail et dont les noms ne figurent
malheureusement pas sur ces pages,
qu'ils trouvent ici le témoignage
de mon estime et de ma gratitude.

Résumé

Le projet consiste à la conception et à la réalisation d'un broyeur et son outil pour broyer les déchets en plastique. Ce projet vise deux objectifs : réduire, d'une part, l'impact négatif sur l'environnement et participer, d'autre part, à l'économie circulaire (recyclages).

Le broyeur est une machine servant à réduire les déchets plastiques en petit morceaux ou paillettes pour leurs réutilisation dans les transformations plasturgiques.

Le mécanisme conçu est motorisé avec des lames en organes actifs dans le processus debroyage qui utilise le cisaillement.

L'étude consiste en un dimensionnement global de tous les organes mécaniques du broyeur, selon des procédures de conception basées sur l'analyse fonctionnelle et les calculs de résistance. L'étude a englobé aussi l'aspect fabrication avec la présentation de contrats de phases des principaux composants du broyeur.

Abstract

The project consists of the design and construction of a crusher and its tool to crush plastic waste. This project has two objectives : to reduce the negative impact on the environment and to participate in the circular economy (recycling). The crusher is a machine used to reduce plastic waste into small pieces or flakes for their reuse in plastic processing. The designed mechanism is motorized with blades in active organs in the crushing process which uses shear. The study consists of an overall dimensioning of all the mechanical parts of the crusher, according to design procedures based on functional analysis and resistance calculations. The study also encompassed the manufacturing aspect with the presentation of phase contracts for the main components of the crusher.

ملخص

يتكون المشروع من تصميم وصنع كسارة وأدتها لسحق النفايات البلاستيكية. هذا المشروع له هدفان: تقليل التأثير السلبي على البيئة من ناحية والمشاركة، من ناحية أخرى، في الاقتصاد الدائري أي الرسكلة. الكسارة عبارة عن آلة تستخدم لتقليل النفايات البلاستيكية إلى قطع صغيرة أو رقائق لإعادة استخدامها في معالجة البلاستيك. الآلة المصممة مزودة بمحرك بشفرات هي الأعضاء النشطة في عملية التكسير التي تستخدم القص. تتكون الدراسة من قياس شامل لجميع الأجزاء الميكانيكية للكسارة، وفقاً لإجراءات التصميم بناءً على التحليل الوظيفي وحسابات المقاومة. كما اشتملت الدراسة على جانب التصنيع مع تقديم عقود المرحلة للمكونات الرئيسية للكسارة.

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Généralité sur les broyeurs

I.1 Les broyeurs.....	3
I.2 Usages des broyeurs.....	3
I.3 Types de broyeurs	4
I.4 Classification des broyeurs	10
I.5 Outils des broyeurs.....	11
I.6 Les outils de coupe.....	13
I.7 Classification des outils de coupe	13
I.8 Matériaux pour outils de coupe.....	18
I.9 Fabrication des outils	24

Chapitre II Généralité

II.1 La fabrication mécanique	26
II.2 Eléments des contacts (Fixes/Mobiles)	28
II.3 Eléments de transmissions de mouvements et puissances	31
II.4 Roulements	34
II.5 La fabrication Mécano-soudée	36
II.6 Caractéristiques des matériaux utilisés en mécano-soudage.....	37
II.7 Conception des machines	38

Chapitre III Problématique, données de base et calculs

conceptuels

III.1 Problématique, données et schéma de la machine.....	40
III.2 Données de la matière à broyer, de la machine et de l'outil de broyage	41
III.4 Calcul de la force de cisaillement.....	44
III.5 Calcul de la fréquence de rotation N du tambour du broyeur (outil)	45
III.6 Calculs des puissances de cisaillement P_c et utile P_a	46
III.7 Dimensionnement de l'arbre porte tambour	46
III.8 Choix des roulements et des paliers	48
III.9 Grandeurs géométriques du palier choisi (diamètre arbre 20-65 mm).....	51
III.10 Durée de vie nominale L_h du roulement en heures de fonctionnement	51
III.11 Jeu entre les lames	51
III.12 Choix des aciers des principales pièces du broyeur.....	52

Chapitre IV Etude d'usinage

IV.1 Dessins des éléments du broyeur	54
IV.2 Gamme de montage	68
IV.3 Contrats de phases d'usinage	70
Conclusion générale	79
Références bibliographiques.....	80

Liste des symboles

Symboles	Désignation	Unité
Re	Limite d'élasticité de l'acier	MPA
σ_p	Résistance pratique de l'acier	MPA
Rm/Rr	Résistance à la rupture par traction	MPA
τ /Re	Limite de rupture du plastique	MPA
Fc	Force de coupe	N
d	Diamètre de l'arbre	mm
D	Diamètre du Tambour	mm
Vc	Vitesse de coupe	m/min
N	Vitesse de rotation	tr/min
Pc	Puissance de coupe	W
Pa	Puissance absorbée par la machine	KW
R	Rayon	mm
e	Épaisseur	mm
L	Longueur	mm
σ_e	Limite d'élasticité de l'acier	MPA
C	Charge dynamique	DaN

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liaisons mécaniques.....	41
Tableau 2 : Roues de friction.....	44
Tableau 3: Transmission par engrenages.....	45
Tableau 4: Transmission par poulie courroie.....	46
Tableau 5: Transmission pignon chaîne	46
Tableau 6: Les roulements.....	49
Tableau 7: Caractéristiques mécaniques des thermoplastiques.....	61

Liste des figures

Figure 1: Principales sollicitations	3
Figure 2 : Broyeur à un arbre.....	5
Figure 3 : Broyeur à deux arbres	5
Figure 4: Broyeur à trois et quatre arbres.....	6
Figure 5: Broyeur à lame	6
Figure 6: Broyeur à marteaux.....	6
Figure 7 : Broyeur à mâchoire.....	7

Figure 8: Broyeurs à jets d'air.....	7
Figure 9 : Broyeurs à broches.....	8
Figure 10 : Broyeurs à boulets.....	8
Figure 11: Broyeurs à barres	9
Figure 12 : Broyeurs à cylindres.....	9
Figure 13: Broyeurs à meule.....	10
Figure 14: Outils des broyeurs - Lames et couteaux	11
Figure 15 : Outils des broyeurs - Fléaux	12
Figure 16 : Outils des broyeurs - Marteaux	12
Figure 17 : Outils des broyeurs - Boulets moulés, forgés	12
Figure 18 : Outils des broyeurs - Boulets céramiques.....	13
Figure 19: Outils des broyeurs - Barres.....	13
Figure 20: Outils de coupe.....	14
Figure 21: Coupe orthogonale	14
Figure 22: Coupes orthogonales et obliques.....	15
Figure 23: Direction de l'arrête	15
Figure 24 :Différents types d'outils	16
Figure 25: Partie active de l'outil	16
Figure 26: Angles de dépouille	18
Figure 27: Angles de coupe.....	18
Figure 28: Influences de l'angle de coupe.....	18
Figure 29: Procédé PVD.....	21
Figure 30 : Procédé CVD.....	21
Figure 31: Matériaux d'outils et leursduretés à chaud et tenacité.....	23
Figure 32 : Matériaux d'outilset leurs performances à la coupe.....	23
Figure 33: Partie active de l'outil	24
Figure 34 : Stellites.....	24
Figure 35: Plaquettesde coupe	24
Figure 36: Outils en diamant.....	25
Figure 37: Perçage, tournage et fraisage.....	26
Figure 38: Pièce forgée à chaud.....	27
Figure 39: Pièces frittées.....	27
Figure 40: Pièces moulées.....	28
Figure 41: Liaisons	30

Figure 42: Liaison obstacle	30
Figure 43 : Liaisons par adhérence.....	30
Figure 44: Liaison complète.....	31
Figure 45 : Liaison partielle.....	31
Figure 46: Liaison démontable.....	31
Figure 47: Liaison indémontable.....	31
Figure 48: Liaison élastique.....	31
Figure 49: Schéma cinématique	41
Figure 50: Cisailage des tôles	42
Figure 51: Cisaille à lames parallèles.....	43
Figure 52: Cisaille à lames obliques	43
Figure 53: Vitesses de coupe en fonction des matériaux.....	45
Figure 54: Palier à semelle haute performance.....	46
Figure 55: Dimensions du palier à semelle NSK.....	47
Figure 56: Roulements à rouleaux sphériques à alésage conique.....	47
Figure 57: Cage en acier embouti.....	49
Figure 58: Cage en laiton usiné.....	50
Figure 60 : Jeu entre les lames	52

Introduction générale

Les plastiques apparaissent aujourd'hui comme de véritables "matériaux miracles". L'essor constant de la production d'articles en plastique, partout dans le monde, tient directement aux qualités intrinsèques de tels objets. Par conséquent, le plastique est la matière la plus utilisée par de nombreuses branches de l'industrie, et son utilisation ne s'arrête pas à la conservation des éléments alimentaires. Il est en concurrence avec les matériaux traditionnels dans l'emballage, la construction, l'électroménager, le loisir, l'industrie automobile. Grâce à sa légèreté, il est souvent utilisé dans la fabrication des bouteilles d'eau, il réduit ainsi la quantité de matière requise comparativement au verre et au métal en terme de poids. Il requière moins d'énergie pour être transporté et comme il est durable, il requière relativement moins d'emballage de protection. Le plastique domine donc notre vie, il fait partie de la vie quotidienne au point qu'on ne peut pas ouvrir les yeux sans le voir.

Malgré ses précieuses utilités, le plastique devient de plus en plus inquiétant, car une fois utilisé, il génère des déchets volumineux par rapport à leurs poids. Sa dissémination dans la nature est durable et inesthétique, elle peut durer des siècles, il n'est pas biodégradable. Afin de diminuer ses effets négatifs, il est temps de passer au recyclage. Celui-ci est une activité qui permet de ramener les déchets du plastique à un état utilisable pour la fabrication du nouveaux produits, ce qui permet d'économiser de 50% à 60% de l'énergie qui serait nécessaire pour fabriquer les même produits à partir de matière première. De plus, le recyclage est devenu dans certains pays l'une des priorités sur le plan économique et même sociale, vu sa rentabilité et sa création des postes d'emplois.

Afin de réaliser ce but, on a besoin d'une machine capable de découper tout produit en matière plastique en petits morceaux de quelques mm pour pouvoir les réutiliser. Ce processus comprend 3 étapes : lavage, découpage et passage dans le fourneau (presse).

Pour ce projet d'étude, nous nous sommes intéressés à l'étape importante de découpage, plus exactement à la machine de découpe du plastique ou au broyeur. La conception d'une telle machine exige surtout un choix convenable des lames coupantes, capables de déchiqueter avec un minimum de chocs possibles et de résister à la corrosion. La machine est composée d'une série de lames montées sur un tambour supporté par deux paliers à roulements. La rotation de l'arbre est assurée par un moteur électrique par l'intermédiaire d'organes de transmission de mouvements. L'ensemble arbre + lames est monté dans une carcasse métallique nommée chambre de découpe ou de déchiquetage. Le tout est fixé sur un support métallique assez élevé pour pouvoir organiser la récupération des morceaux de plastique ou pour pouvoir collecter les broyats sortants de la machine soit dans des sacs convenables, soit par convoyeur. Chaque organe de la machine est soigneusement étudié pour assurer une performance assez élevée et une maintenance minime.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres : le premier chapitre présente des généralités sur les broyeurs de différents matériaux : plastiques, composites, bois, aciers, alliages composés et frittés...etc. Il comporte aussi une présentations des outils de coupe et des outils de broyage : types, conceptions et caractéristiques. Le deuxième chapitre est réservé à certains aspects de la construction mécanique tels : les éléments de contacts fixes / mobiles, les éléments de transmission de mouvements, courroies et engrenages, les roulements, la

fabrication mécano-soudée et enfin la conception des machines. Le troisième chapitre est réservé à la problématique et aux données de base de la machine et son outil de broyage. Dans ce chapitre, on y trouve aussi les calculs préliminaires, le schéma et les dessins préalables du broyeur. Le quatrième et dernier chapitre présente, quant à lui, les dessins de définition des éléments ou composants principaux du broyeur, y compris ceux de l'outil de broyage, la gamme d'assemblage et les contrats de phases de fabrication des éléments à usiner. Enfin, aux dernières pages de ce mémoire, on y trouve une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur les broyeurs

I.1 Les broyeurs

➤ Définition du broyage

Le broyage est une opération consistant à diviser un solide à une dimension donnée, correspondant à son emploi, c'est-à-dire réduire la matière en petits fragments ou en poudre. Pour cela, il faut la soumettre à des forces de contraintes supérieures à sa résistance. Naturellement, il existe des sollicitations principales qui permettent de solliciter tout objet ou pièce mécanique, à savoir : compression / traction, cisaillement, flexion et la torsion.

En broyage souvent les sollicitations, appliquées sur la matière à broyer, sont combinées. Cette combinaison se déroule entre, au moins, deux des cinq principales sollicitations, comme le montre la figure 1[5].

Dans cette étude pour le broyage des matières plastiques le mode de sollicitation, le plus important, est le cisaillement; c'est d'ailleurs la fonction principale du broyeur.

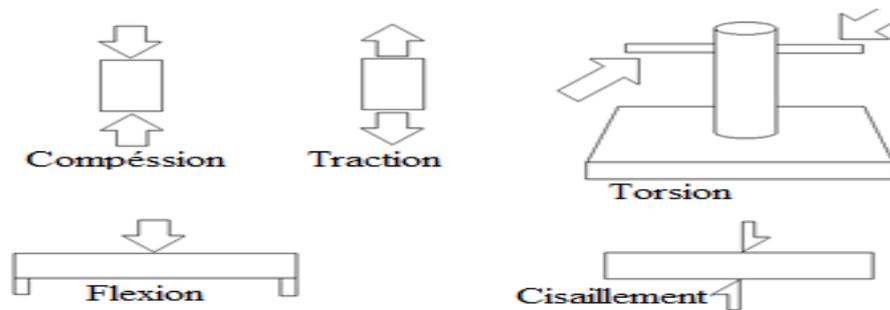


Figure 1 : Principales sollicitations

➤ Définition d'un broyeur

Un broyeur est une machine ou un équipement utilisé pour le broyage. Les systèmes de déchiquetage sont utilisés pour réduire la taille d'un matériau donné en appliquant sur le matériau des charges qui lui permettent de dépasser sa limite de rupture et par conséquent le broyer[5].

I.2 Usages des broyeurs

L'usage des broyeurs est très répandu dans la gestion des déchets. D'ailleurs, ce rôle très crucial est remarquable par l'emploi de broyeurs industriels dans le traitement des déchets. L'utilisation de méga broyeurs dans les centres de recyclage des systèmes d'élimination des déchets à grande échelle et les décharges municipales sont liés à la réduction des matériaux. L'asphalte, le caoutchouc, le bois, les plastiques et les matériaux similaires peuvent être rapidement condensés à une simple fraction de leur taille d'origine.

Il convient également de noter que les déchets biodégradables se décomposent plus rapidement lorsqu'ils sont déchiquetés. S'ils sont correctement déchiquetés, les matériaux enfouis dans les décharges prennent beaucoup moins de place.

Dans l'environnement économique actuel, les collectivités et les entreprises sont toujours à la recherche de nouvelles façons de réduire les coûts et l'utilisation de broyeurs offre de

nouvelles options stratégiques. Le broyage de matériaux dans le processus de recyclage du plastique a deux objectifs principaux : premièrement, en réduisant le volume de matière il y a réduction des coûts de transport et de stockage; deuxièmement, les broyeurs automatisés, en particulier dans le recyclage des déchets électroniques, libèrent également des matériaux pour le recyclage. De nombreuses options sont disponibles, en fonction de l'application spécifique. Avant de faire un investissement, les acheteurs potentiels doivent comprendre des facteurs tels que :

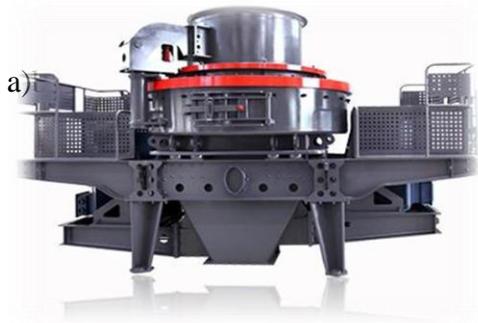
- L'assortiment d'articles à recycler
- Volume de débit
- Exigences des acheteurs résiduels en termes de paramètres tels que la taille des particules

I.3 Types de broyeurs

Les broyeurs industriels sont équipés de différents types de systèmes de coupe, selon que la conception de l'arbre est verticale ou horizontale, il y a des systèmes de coupe à arbre unique, à deux arbres, à trois arbres et même à quatre arbres.

• Broyeur à un arbre

Les broyeurs conviennent à un large éventail d'applications, notamment la production de sable de haute qualité, d'agrégats bien formés et de minéraux industriels. Les broyeurs peuvent également être utilisés pour le façonnage ou le retrait de la pierre tendre des agrégats



a)



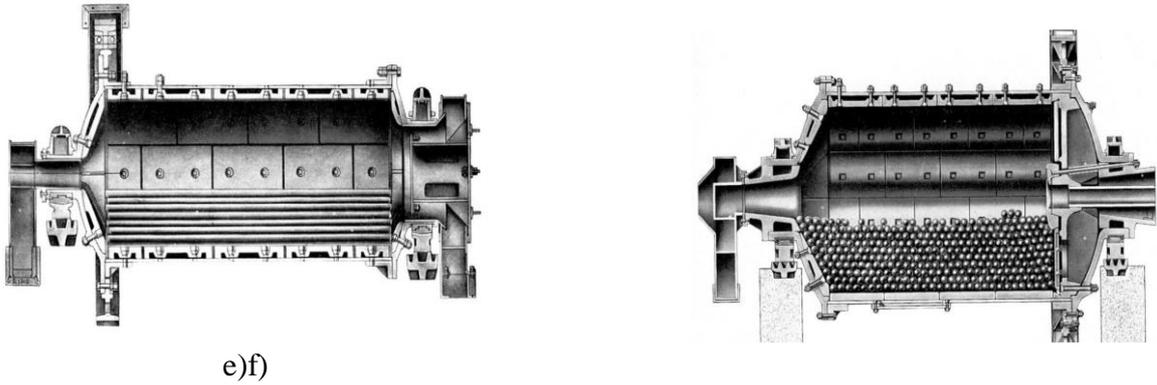
b)



c)



d)



e)f)

Figure 2 : Broyeurs à un arbre

a) broyeur à axe vertical ; b) broyeur de papier mono-rotor ; c) de bois mono-rotor ; d) broyeur de sachet nylon mono-rotor; e) broyeur à barres; f) broyeur à boulettes (à billes)

- **Broyeur à deux arbres**

C'est la gamme la plus utilisée des broyeurs, elle est exploitée par les particuliers et par les industriels. Elle s'étend du broyage de papiers installé dans les bureaux jusqu'au broyage des grandes voitures planté dans les décharges de voiture.



a)b)

Figure 3 : Broyeurs à deux arbres

a) Broyeur de verre ; b) Broyeur de voitures

- **Broyeur à trois arbres et à quatre arbres**

Contrairement aux précédents broyeurs, les broyeurs à trois et à quatre arbres ne sont pas trop utilisés, vu leurs coûts très élevés; par contre, ils sont plus précis en terme de finition du broyage, souvent le deuxième broyage n'est pas nécessaire et les bons résultats sont directement obtenus dès le premier broyage.

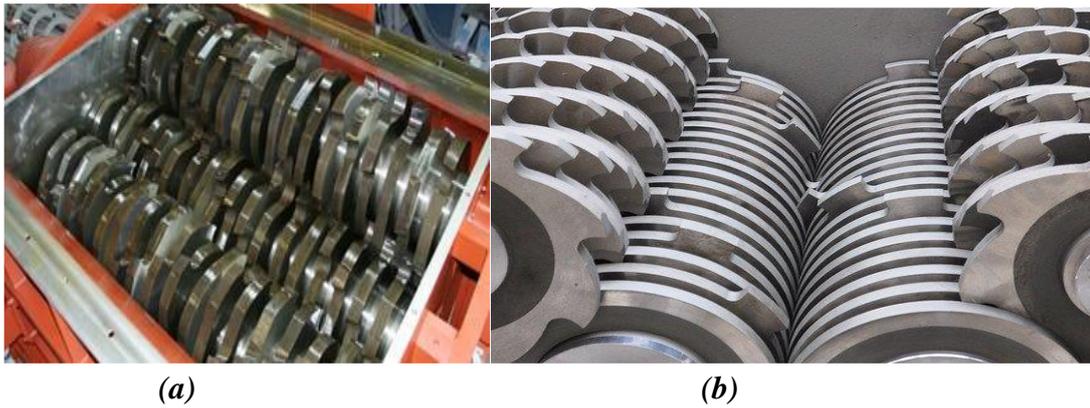


Figure 4 : Broyeurs
a) à trois rotors ; b) à quatre rotors

- **Broyeurs à lames**

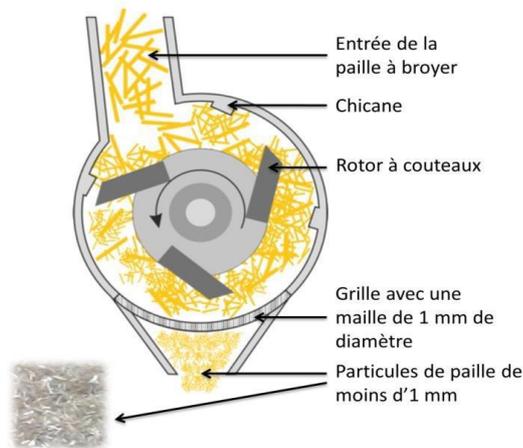


Figure 5 : Schéma d'un broyeur à lames

Le broyeur à lames, parfois appelé granulateur, met en œuvre un système rotor-stator qui cisaille le produit broyé. Les appareils de ce type sont particulièrement recommandés pour le traitement des matériaux plastiques, fibreux et aussi pour le papier...

- **Broyeurs à marteaux**

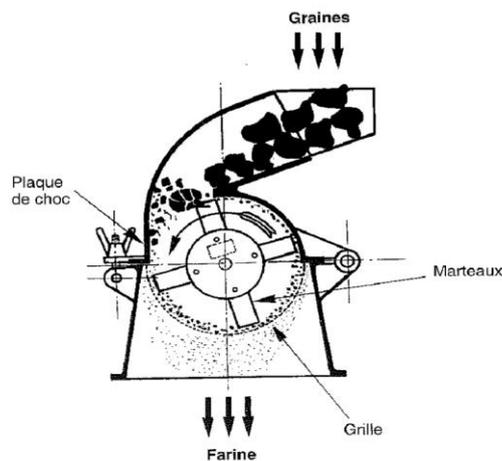


Figure 6 : Schéma d'un broyeur à marteaux

Les matériaux sont tirés dans la chambre de broyage par les percuteurs fixés sur le rotor qui tourne à grande vitesse. Le broyage s'effectue principalement entre la grille et les marteaux. Le broyeur constitué de marteaux : les grains vont se casser dans la chambre de broyage contre ceux-ci

- **Broyeurs à mâchoires**

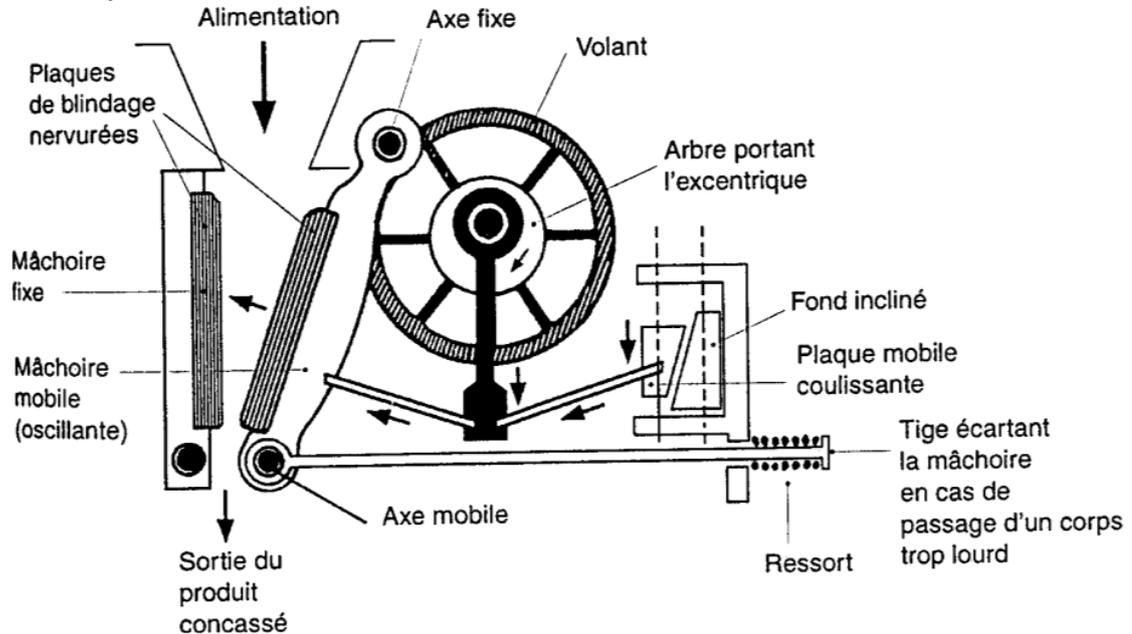


Figure 07 : Schéma d'un broyeur à mâchoire

Le broyeur à mâchoire se compose d'une mâchoire mobile supportée par un arbre excentrique concasse le produit contre une autre statique.

- **Broyeur à jets d'air**

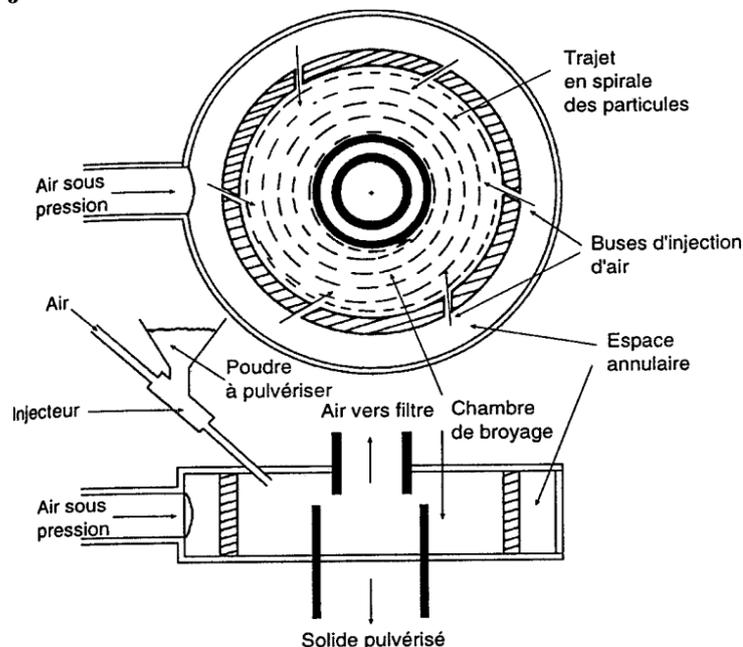


Figure 08 : Schéma d'un broyeur à jets d'air

Le principe du broyage à jet d'air est que lorsque le gaz comprimé sort d'une buse, il est accéléré à des vitesses extrêmement élevées. Le broyage est le résultat d'une collision entre particules.

- **Broyeur à broches**

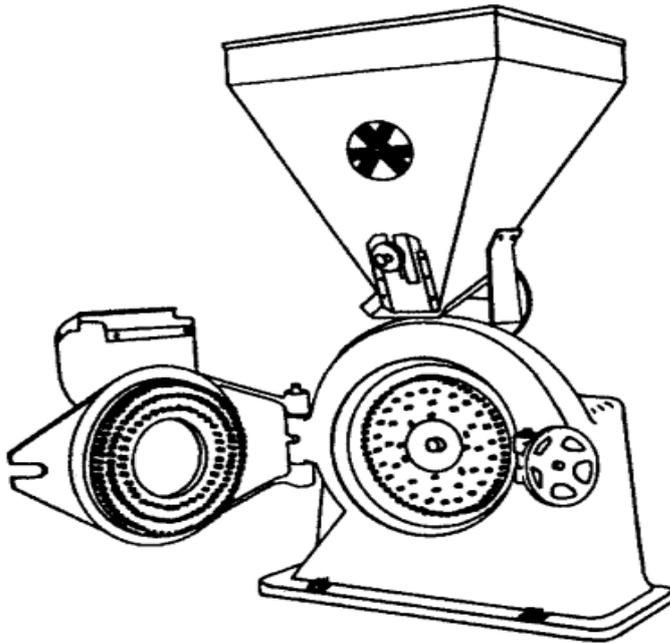


Figure 09 : Schéma d'un broyeur à broches

Le broyeur à broche se compose d'un rotor et d'un stator, la poudre étant introduite par le centre du disque stator et ressortant en passant au travers des broches où elles se cassent.

- **Broyeurs à boulets et à barres**

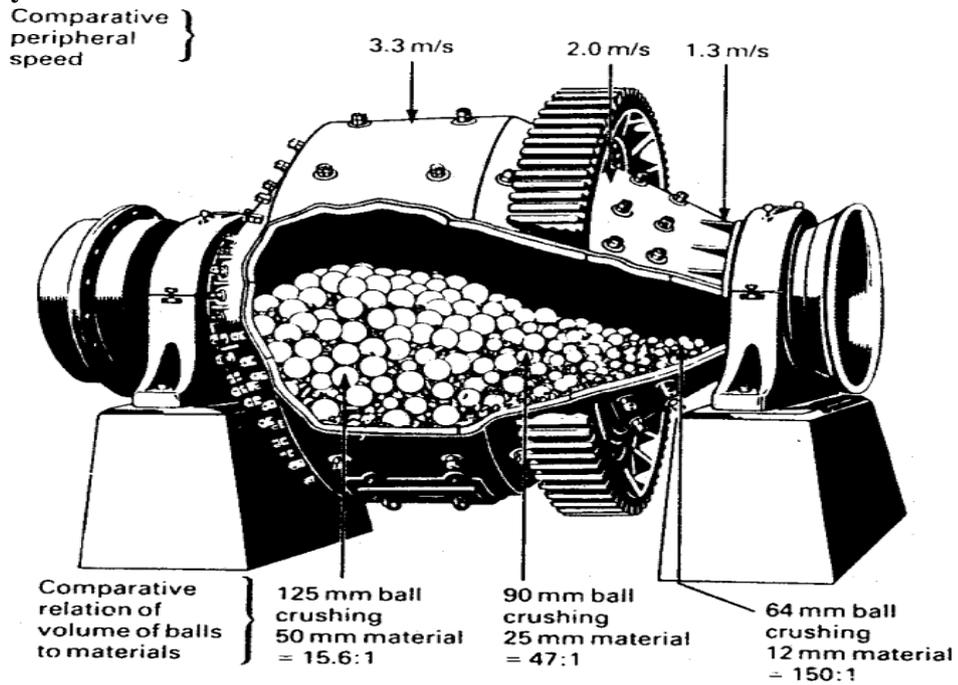


Figure 10 : Schéma d'un broyeur à boulets

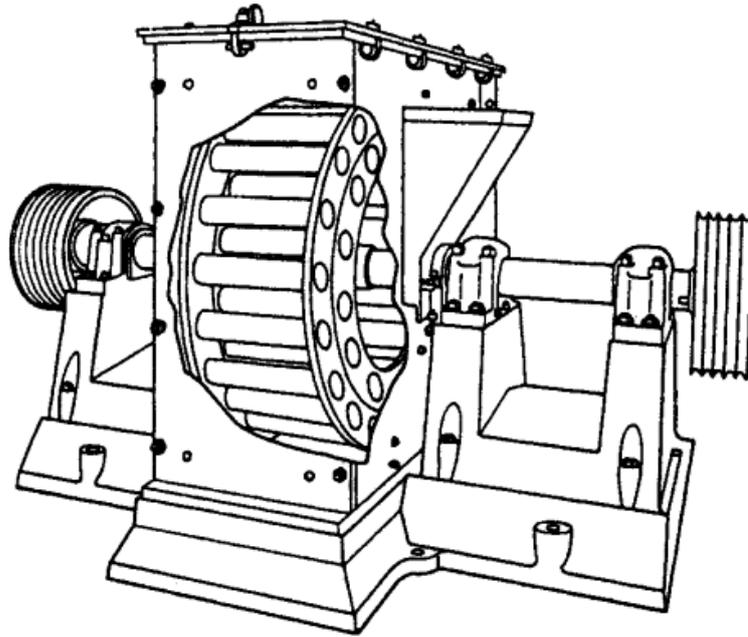


Figure 11 : Schéma d'un broyeur à barres

La matière à broyer est alimentée au broyeur par un ou deux tourillons et est broyée par les boulets ou les barres par impact et friction.

- **Broyeurs à cylindres**

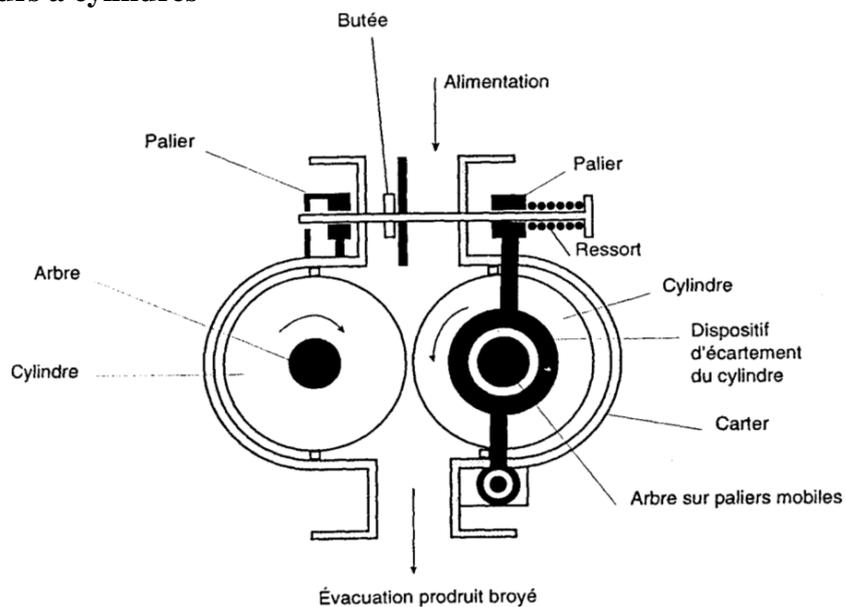


Figure 12 : Schéma d'un broyeur à cylindres

Les cylindres tournent en sens opposé et à des vitesses différentes. La surface des cylindres (lisses ou cannelés), leurs vitesses de rotation et leur écartement conditionnent la finesse de la mouture.

- **Broyeurs à meule**

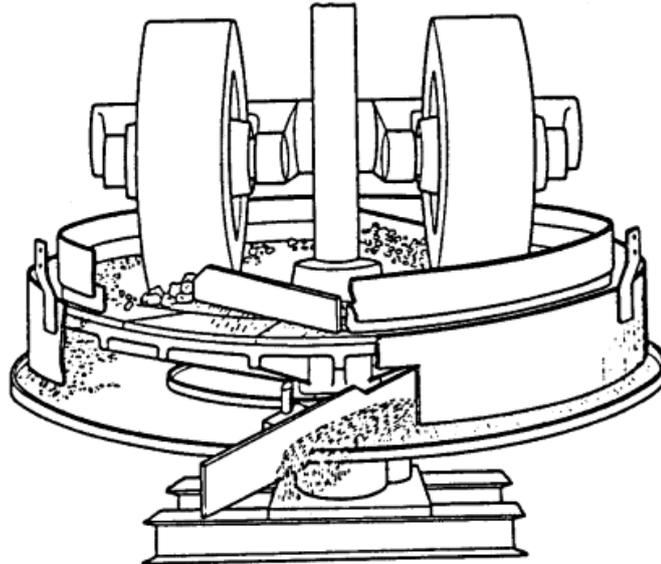


Figure 13 : Schéma d'un broyeur à meule.

Le principe de fonctionnement est le broyage du grain par écrasement entre deux surfaces abrasives.

Ils sont constitués d'une meule fixe et d'une meule mobile tournant sur la première, dans un plan horizontal ou vertical. Les deux meules sont de matière et de dimensions identiques.

I.4 Classification des broyeurs

Dans les industries, quel que soit le broyeur utilisé pour telle matière, on peut toujours différencier les fragments de ses déchet selon leurs diamètres, donc il est préférable de les classer en se basant sur ce critère et on distingue trois familles des broyeurs :

- Broyeur à fragmentation grossière (particules de l'ordre du mm); dans ce type on rencontre habituellement :
 - Broyeur à couteaux, utilisé généralement pour broyer du plastique ou du papier;
 - Broyeur à marteaux, utilisé pour broyer les matières dures tel que la pierre, la roche ou le verre.
- Broyeur à fragmentation fine (1000 à 10 μ m); les technologies ont été pratiquement restreintes à un seul mode d'action consistant à la mise en œuvre de forces d'impact ou les particules sont, soit comprimées entre les corps broyant, soit projetées violemment contre une paroi fixe ou mobile, soit les unes contre les autres et dans ce cas-là, on parlera d'auto broyage.
- Broyeur à fragmentation ultrafine; dans le domaine de l'ultrafin, les particules sont de tailles comprises entre 5 et 10 μ m, les forces mises en œuvre sont du type compression, cisaillement et impact.

Les broyeurs de plastique

Comme on a vu précédemment les broyeurs sont des machines de broyage qui permettent de réduire le volume d'un objet dont le but est de simplifier son déplacement, son retraitement ou carrément sa détérioration.

Le broyeur de plastique, **objet de ce projet d'étude**, a exactement les même objectifs. Puisque la matière à broyer est du plastique, il peut donc utiliser les **couteaux, les lames comme outils de coupe et le cisaillement comme principe de broyage**.

Principales caractéristiques

Les broyeurs sont caractérisés principalement par :

- la puissance,
- le débit massique,
- le matériau auquel ils sont destinés,
- la vitesse.

Ils sont dotés d'une unité de chargement qui est souvent une simple trémie. Cette partie remplit une fonction qui n'est pas négligeable; en effet, elle doit placer la matière le mieux possible dans le groupe de broyage afin d'éviter tout problème au cours de la trituration.

L'action coupante du broyeur est réalisée par une série d'éléments tranchants (couteaux, lames,...etc) qui coupent le plastique en se croisant.

Les éléments principaux du système sont les arbres qui portent des couteaux ou des lames. La motorisation du groupe de broyage est assurée habituellement par un moteur électrique qui permet, à travers des éléments de transmission de mouvement, de transmettre sa puissance aux arbres ayant les éléments tranchants et d'exercer les forces nécessaires au broyage.

I.5 Outils des broyeurs

Selon les types d'appareils et selon la nature des matières traitées, les broyeurs utilisent :

- les lames (couteaux)
- les marteaux (fléaux)
- les mâchoires
- les boulets et barres
- les cylindres (ou rouleaux)
- les meules

➤ Les lames et les couteaux

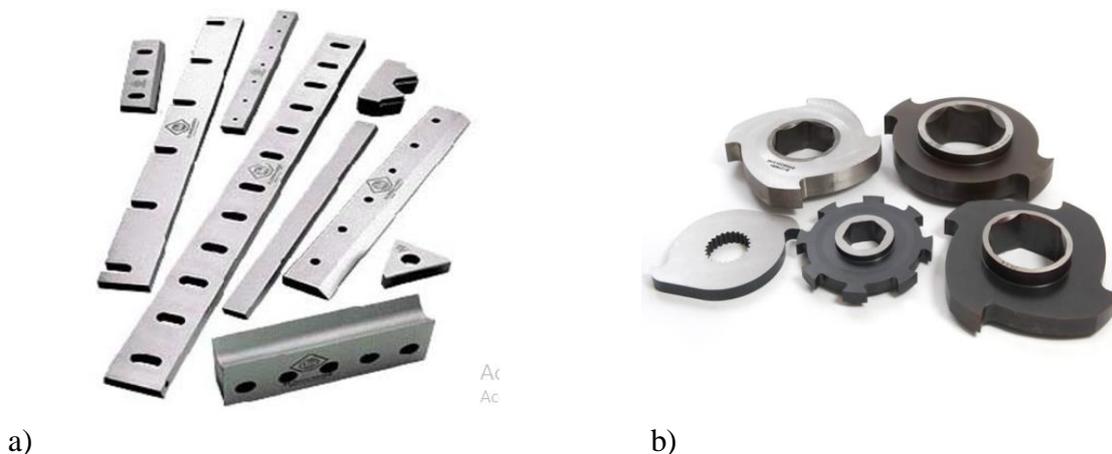


Figure 14: Outils des broyeurs
a) Lames (couteaux droits); b) couteaux (lames) formes divers

➤ Les marteaux et les lames fléaux

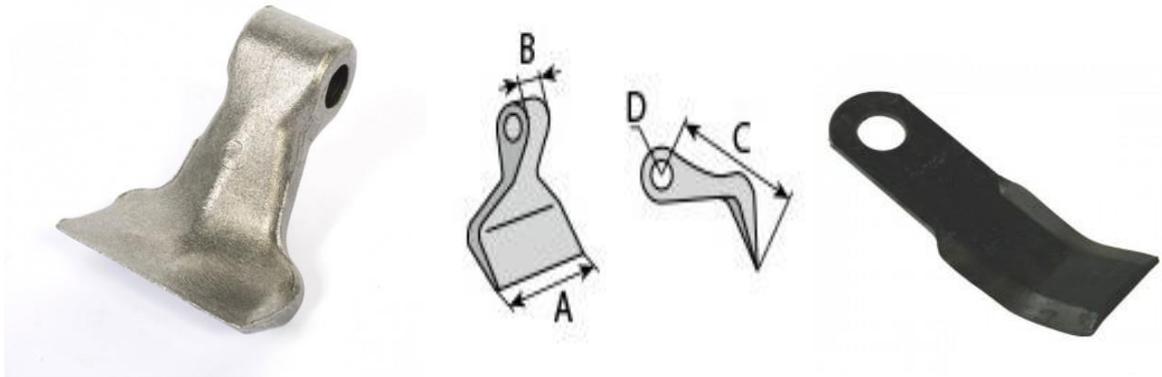


Figure 15 : Outils des broyeurs- Fléaux



Figure16 : Outils des broyeurs- Marteaux

➤ Boulets et Barres



*Figure 17 :Outils des broyeurs
a) Boulets moulé);b)Boulets forgés*



Figure18 : Outils des broyeurs - Boulets en céramique



Figure19 : Outils des broyeurs - Barres

Matériaux des outils de broyage

- Les billes ou boulets sont en matériaux variés : en alumine frittée, en porcelaine ou en acier revêtu de Corin dur ou en calcaire de schiste; alors que les cuves peuvent être en acier revêtu de Corin dur ou en calcaire de schiste ou en matériaux à haute teneur en alumine, en porcelaine ou en manganèse.
- Les marteaux et les fléaux sont en acier à haute teneur en manganèse.
- Les couteaux et les lames sont en aciers de haute qualité : acier à haute teneur en manganèse ou acier à 12% de chrome ou ARS (HSS).

I.6 Les outils de coupe

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et la foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. L'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part, de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part, des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification. Il y a aussi le développement d'autres technologies et techniques telles : la métallurgie des poudres, le revêtement, qui ont contribué à fournir des outils de plus en plus efficaces [1],[3].

I.7 Classification des outils de coupe

Les machines-outils utilisent une grande gamme d'outils d'usinage et cela selon le type d'opération et la forme de la pièce à réaliser. On distingue deux classes :

1. Outils à arrête unique: ce type d'outils a la particularité d'avoir une seule arrête tranchante, ils sont uniquement utilisés en tournage et en rabotage (étiau limeur), leur pointe est généralement arrondie pour former un rayon de bec d'outil (Figure 20, a)

2. Outils à arrête multiples: ces outils comme leur nom l'indique possèdent plusieurs arrêtes tranchantes et sont de forme cylindrique. On les utilise dans les opérations de parçage, d'alésage et de fraisage où le mouvement de coupe leurs est attribué (Figure 20, b).

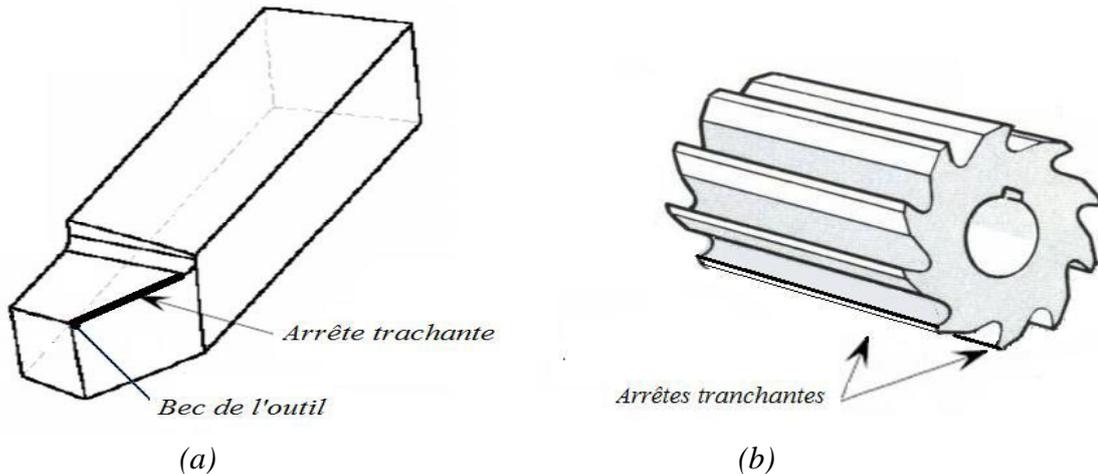


Figure 20 : Outils de coupe; a)outil de tournage ;b) fraise une taille

Coupe orthogonale

La coupe orthogonale est la configuration la plus simple pour usiner une pièce. Cette configuration est actuellement peu employée dans le monde industriel. En effet, dans la pratique, seuls quelques procédés classiques permettent d'obtenir ces conditions comme par exemple le rabotage, le tournage de tube en bout et l'usinage de palier.

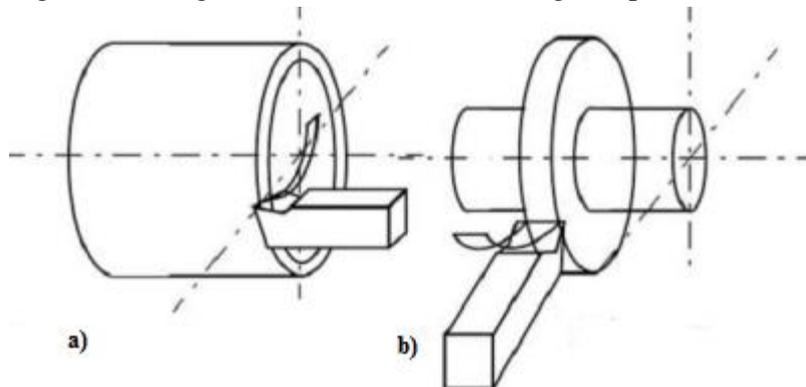


Figure 21 : Configuration de la coupe orthogonale

a) Usinage de tube en bout; Usinage de palier.

La figure montre la configuration de la coupe orthogonale, au moment où l'outil coupe la matière avec une seule arête tranchante perpendiculaire à la vitesse d'avance f et à la vitesse de coupe V_c (figure 21, a et b), (figure 22, a), (figure 23, a).

Coupe oblique

Une deuxième représentation schématique de la formation du copeau, où on peut la rencontrer dans la plupart des procédés d'usinage sur machine-outil, est la coupe oblique (figure 22, b). En coupe oblique, l'arête de coupe est orientée d'un angle d'inclinaison λ par rapport à la

normale de la direction de coupe, dans le plan contenant V_c et l'arête (figure 22, b), (figure 23, b).

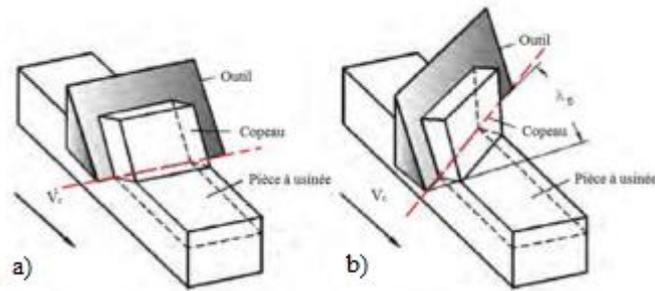


Figure 22 : Illustration de la coupe, a) orthogonale et b) oblique.

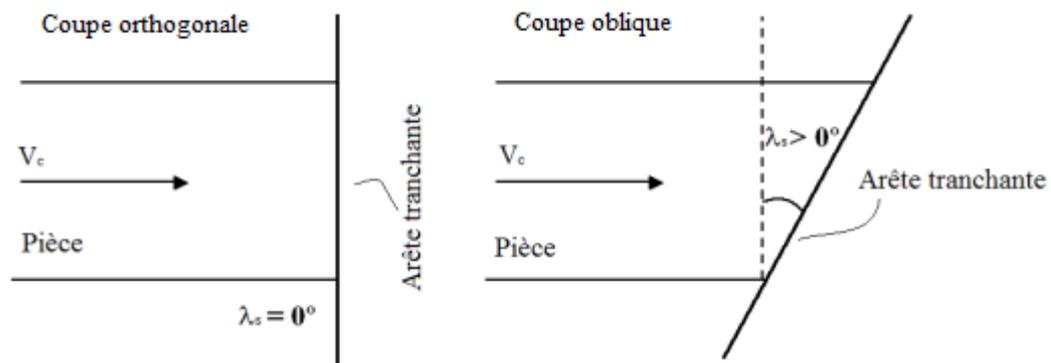
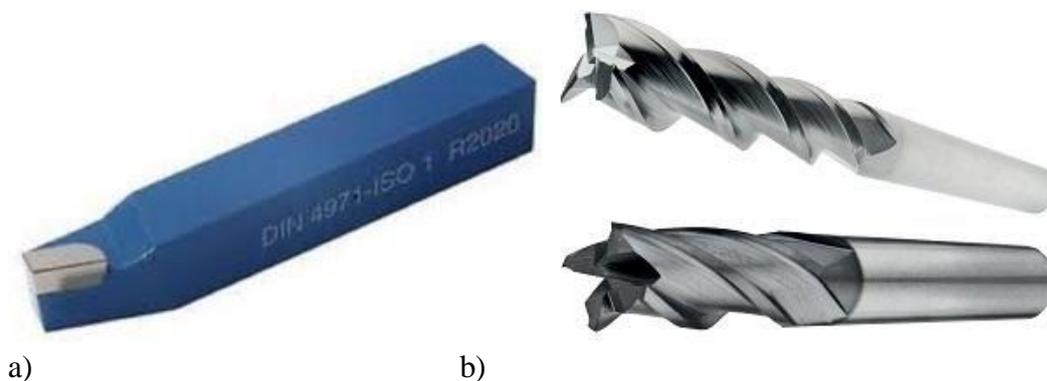


Figure 23 : Schéma des directions de l'arête en a) coupe orthogonale et b) oblique.

Ajouter une inclinaison λ_s à l'outil permet d'analyser la coupe, par une approche plus réaliste et ainsi l'étude de la formation du copeau dans le cas le plus général. Cependant, la coupe oblique n'est qu'une transposition du cas orthogonal par rotation du plan de cisaillement (Figure 23), mais l'étude du cas général de coupe des métaux s'avère plus complexe.

Outils de coupe et leurs nuances

Les fabricants d'outils de coupe fournissent aux artisans et manufacturiers des outils avec des géométries différentes et des prix différents selon les opérations d'usinage voulues (tournage, fraisage, perçage, ...etc) et sous différents aspects : outils en bloc en acier rapide, outils à plaquettes brasées et en plaquettes amovibles (Figure 24).



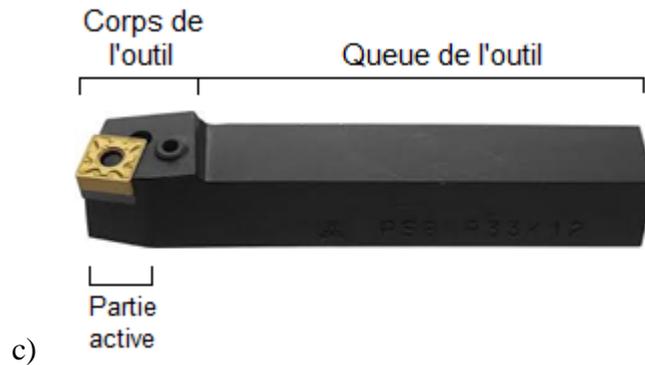


Figure 24 : Présentation des différents types d'outils; a) outil à charioter à plaquette brasée; b) fraise monobloc ARS(HSS); c) outil à charioter plaquette amovible[4].

En général, un outil de coupe est constitué d'un corps et d'une queue. Cette dernière est de section circulaire ou carrée et a pour rôle le maintien de l'outil au porte-outil (la tourelle en tournage, la broche en fraisage et perçage), la première partie est destinée à recevoir les éléments tranchants ou plaquettes. L'élément coupant est limité par des faciès dont l'intersection forme les arêtes. Seules les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille qui interviennent dans le processus de la coupe du métal, c'est ces derniers qui forment la partie active(Figure25).

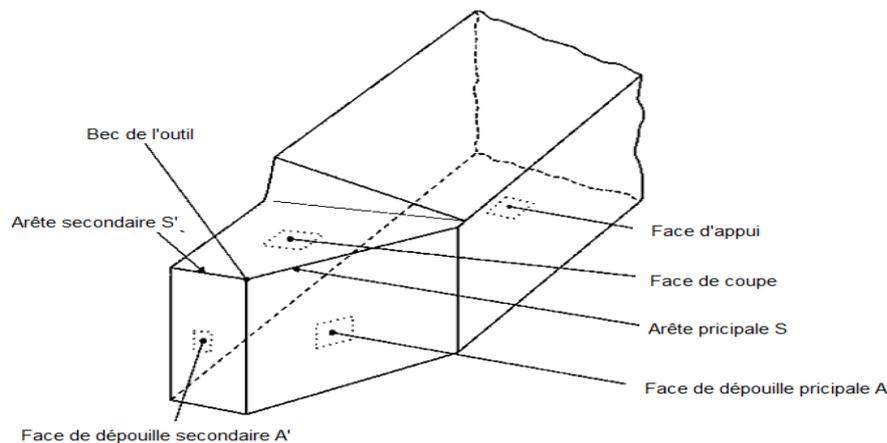


Figure25 : Faciès limitant la partie active de l'outil

Forme et géométrie des outils de coupe

Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et les différents paramètres géométriques de sa partie active. Il est nécessaire de définir les différents angles caractéristiques de l'outil.

À partir des plans de références, on peut définir des systèmes d'angles selon chaque section voulue en notant toujours les désignations d'angles suivants :

- α : angle de dépouille principal
- β : angle de taillant
- γ : angle de coupe
- ψ : angle de direction complémentaire de l'arête

Pour distinguer les angles de coupe d'un plan à l'autre, on attribue l'indice du plan choisi pour chaque angle observé dans sa section. *Exemple* : Sur le plan P_f , les angles observés sont : α_f , β_f et γ_f .

Remarque

Le choix des paramètres de coupe dépend directement de la forme de l'outil de coupe et sa nuance, de la matière de la pièce à usiner, du type de machine-outil et de l'opération à exécuter et des contraintes de finition du produit exigé.

Définition des principaux angles de coupe et leurs influences

L'angle de **direction d'arête principale** K_r est l'angle mesuré dans le plan de référence P_r entre le plan d'arête de l'outil P_s et le plan de travail conventionnel P_f . L'angle de direction d'arête est un facteur déterminant dans le choix de la machine suivant sa puissance.

- Pour des valeurs $K_r < 90^\circ$, on a une entrée en contact progressif de l'arête de coupe avec la matière à usiner ;
- Pour des valeurs trop petites de K_r , la longueur de contact arête de coupe/matière augmente, ce qui provoque également une augmentation des efforts de coupe ;
- L'angle K_r influe aussi sur la direction d'évacuation des copeaux

L'angle de **direction d'arête secondaire** K_r' est l'angle mesuré dans le plan de référence P_r entre la face de dépouille secondaire et le plan de travail conventionnel P_f . L'angle d'**inclinaison d'arête** λ_s est l'angle mesuré dans le plan d'arête de l'outil P_s , entre l'arête et le plan P_r :

- les outils avec $\lambda_s < 0^\circ$ s'utilisent pour des usinages d'ébauche, en raison de la robustesse de l'arête de coupe, et de la bonne fragmentation des copeaux ;
- les outils avec $\lambda_s > 0^\circ$ s'utilisent pour des usinages de finition, les valeurs du copeau minimum étant plus faibles.

L'angle de **dépouille** α est l'angle entre le plan d'arête de l'outil P_s et la face de dépouille (figure 27).

- si l'angle α est trop grand, l'outil présente une arête trop fragile ;
- si l'angle α est trop petit la surface de contact pièce/face de dépouille augmente, ce qui induit le risque de talonnage ;

L'angle de **taillant** β est l'angle entre la face de dépouille et la face de coupe.

L'angle de **pointe** ε est l'angle mesuré dans le plan de référence P_r entre la face de dépouille principale et la face de dépouille secondaire.

L'angle de **coupe** γ est l'angle entre la face de coupe et le plan de référence P_r . L'angle de coupe est un paramètre décisif dans la formation du copeau et selon le matériau à usiner, il peut passer d'une valeur positive à une valeur très négative.

- un angle γ trop grand fragilise l'arête et provoque un écoulement continu de copeau ;
- un angle γ trop petit provoque le frottement du copeau sur la face de coupe ;
- des valeurs $\gamma < 0$ sont réservées aux outils en carbure métallique et en céramique, en raison de la bonne tenue aux efforts et du fait que les copeaux se brisent facilement.

Exemple : Pour l'usinage des aciers durs l'outil doit être plus résistant mécaniquement et thermiquement, en conséquent l'angle de coupe doit être très faible voire négatif, il peut atteindre jusqu'à -20 degrés [1].

Remarque

La somme de ces trois angles de dépouille, taillant et de coupe est toujours égale à 90° . $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$. Dans le cas où la somme de α et de β est supérieure à 90° , on travaille en

coupe négative (γ est négatif). Les angles de direction d'arête principale K_r , de pointe de l'outil ϵ_r , et de direction d'arête secondaire K_r' , leur somme est égale à 180° ($K_r + \epsilon_r + K_r' = 180^\circ$).

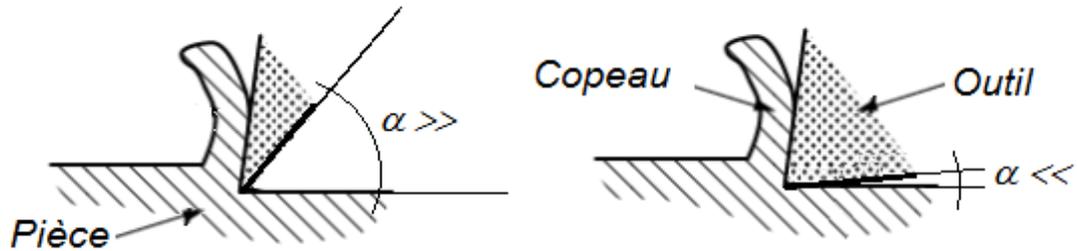


Figure 26 : Influence de l'angle de dépouille.

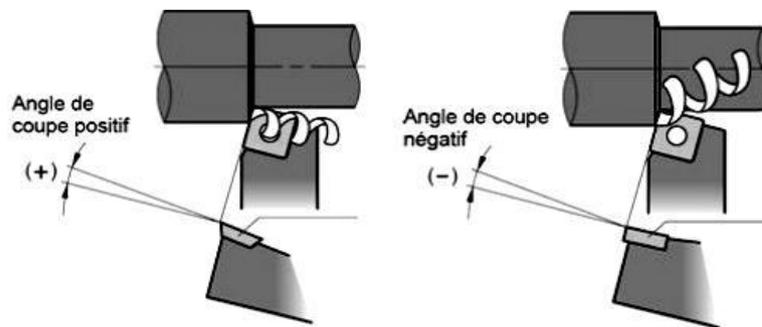


Figure 27 : Influence de l'angle de coupe.

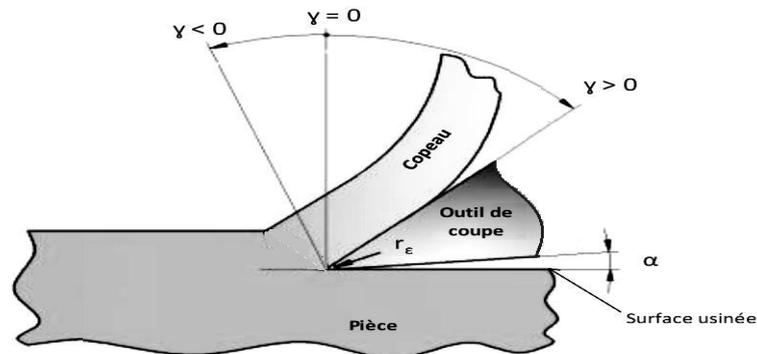


Figure 28 : Angle de coupe.

I.8 Matériaux pour outils de coupe [2], [3]

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe : ténacité et résistance à l'abrasion [2], [3].

Aciers rapides

Le mérite de l'invention des aciers rapides revient aux Américains Taylor et White en 1903. Il est important de souligner que pour chaque nuance d'acier rapide, il existe une limite à la qualification de la matière (par exemple, un outil de fraisage en nuance HS 6-5-2 ne pourra pas usiner, dans des conditions d'usinage industriellement viables, un acier de dureté supérieure à 350 HB. Malheureusement, il est très difficile d'établir des règles par défaut car ces valeurs dépendent du type d'outil (foret, fraise, alésoir...) entre autres ; seuls les essais couple outil/matière peuvent mettre en évidence ces limites.

Aciers rapides au tungstène

Le tungstène a été le premier élément d'addition principal utilisé. L'acier de base HS 18-0-1 a été longtemps le plus employé. C'est en 1912 que l'Allemand Becker proposa l'addition de 5 % de cobalt et créa la nuance HS 18-1-1-5. Le rôle du cobalt est de stabiliser les carbures à chaud. La dureté à chaud s'en trouve donc améliorée et par conséquent la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevées.

Aciers rapides au molybdène

Bien que découverts vers 1910, les aciers rapides au molybdène n'ont connu leur développement qu'à partir de 1945, en raison de la pénurie de tungstène durant la Seconde Guerre mondiale. Ce développement tardif est dû au risque de décarburation et de démolybdénisation de ces aciers, tant au cours de leur fabrication qu'au cours des traitements thermiques, ainsi qu'à leur susceptibilité à la surchauffe due à un domaine de température d'austénitisation très étroit.

Alors que les aciers rapides au tungstène peuvent se traiter dans des fours à air, les aciers rapides au molybdène nécessitent des traitements thermiques en bains de sel ou en four sous vide.

Les avantages des aciers rapides au molybdène par rapport à

Ceux au tungstène sont importants :

- le molybdène est plus abondant dans la nature que le tungstène ;
- le molybdène a une influence double de celle du tungstène sur les capacités de coupe de l'acier : 1 % de molybdène remplace 2 % de tungstène ;
- il est possible d'obtenir des duretés plus élevées avec les aciers au molybdène et, à dureté égale, leur résistance aux chocs est supérieure à celle des aciers au tungstène ;
- le prix de revient des aciers au molybdène est sensiblement inférieur à celui des aciers au tungstène.

La nuance HS 2-9-1-8 est, actuellement, la plus employée des nuances d'aciers rapides à l'exception des outils pour opérations axiales (foret, taraud) pour lesquels la nuance HS 6-5-2-5 est également très employée.

Aciers rapides surcarburés

Les aciers rapides surcarburés, c'est-à-dire ceux dont la teneur en carbone est supérieure à 1 %, permettent d'obtenir des duretés allant jusqu'à 70 HRC soit environ 1 035 HV . La limite de dureté des matériaux usinables a par suite été reculée. C'est ainsi que l'on peut usiner des aciers jusqu'à 52 HRC (soit environ 550 HV).

Aciers rapides resulfurés

Alors que le soufre résiduel est considéré comme une impureté et maintenu à des teneurs inférieures à 0,03 % dans les aciers de base, il peut parfois être ajouté dans certaines nuances d'aciers rapides pour en améliorer l'aptitude à l'usinage et au meulage. Il s'agit en général d'une addition comprise entre 0,10 et 0,20 %. Cette resulfuration permet d'améliorer considérablement l'état de surface après usinage des pièces.

Aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres

Cette technique permet d'obtenir des compositions chimiques et des finesses de structures d'aciers non réalisables par les méthodes d'élaboration conventionnelle. Ce type d'acier est actuellement largement développé. Les aciers rapides élaborés par la métallurgie des poudres présentent les avantages suivants :

- moindre déformation au cours du traitement thermique en raison de l'absence totale de ségrégation ;
- très bonne aptitude à la rectification grâce à la finesse de la structure, notamment des carbures ;
- grande résistance à l'usure et haute dureté à chaud par la possibilité de réaliser des nuances à haute teneur en vanadium et en cobalt, impossibles à élaborer ou à transformer par les procédés conventionnels ;
- très bonne ténacité et bonne isotropie, même pour des produits de forte section, grâce à la finesse et à l'homogénéité de la structure.

Traitements de surface (diffusion et revêtements durs)

Différents types de traitement des surfaces sont applicables aux outils en aciers et en carbures. Nous citerons ici trois des traitements de surface qui représentent 95 % des applications industrielles.

- **Nitruration** ;
- **Nitruration en bain de sels** (parfois appelée **cyanuration**) ;
- **Nitruration ionique**.

➤ Revêtements durs

Vers 1980 se développent les techniques de dépôt ionique permettant de déposer des couches dures de 2 000 à 4 000 HV, telles que le nitrure de titane (TiN) ou le carbure de titane (TiC). Depuis, les méthodes de déposition de ces couches dures ont évolué ainsi que la nature des dépôts. Il existe trois types majeurs de dépôts :

- ❖ **Procédé CVD** (Chemical Vapor Deposition)

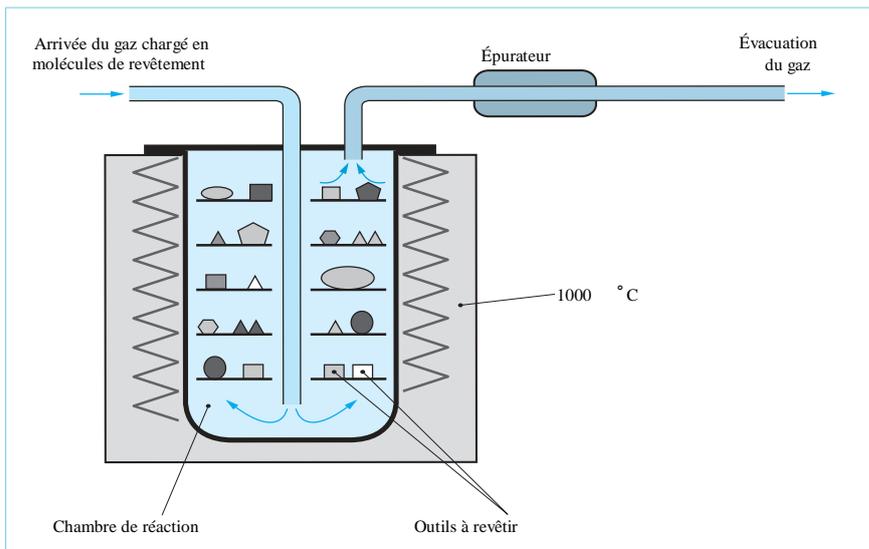


Figure29 : Schéma du processCVD

❖ **Procédé PVD (physical vapor deposition)**

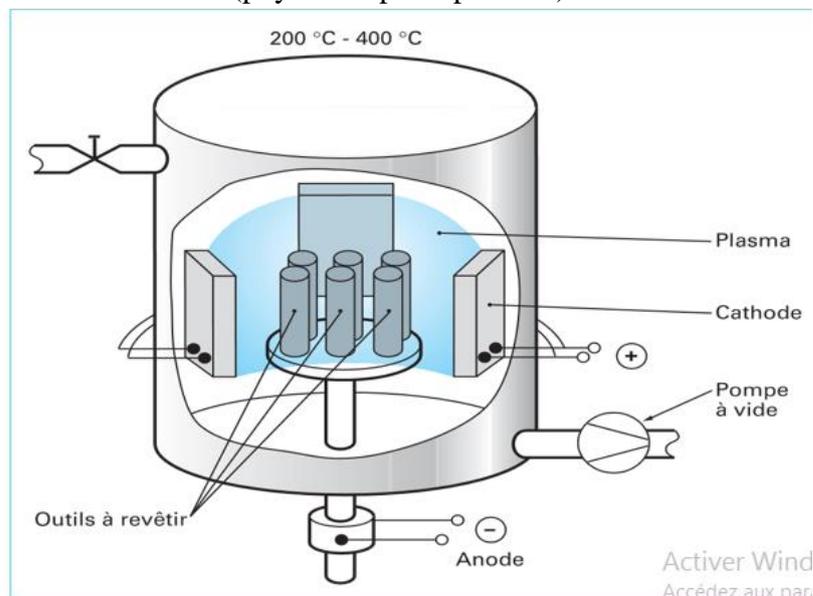


Figure30:Schéma du process PVD

❖ **Procédé MTVD (Medium Température VaporDeposition)**

Carbures métalliques

Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en acier ordinaire, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usage.

Vers 1958 ont été créés les **outils à plaquettes amovibles**. Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux :

- suppression de l'affûtage ;
- absence de brasage, donc une nuance plus dure peut souvent être utilisée (risque de crique éliminé) ;

- conditions de coupe plus sévères ;
- indexage (repérage mécanique) de la plaquette pour remplacer une arête usée ou un changement de nuance plus rapide que le changement d'un outil brasé ;
- affilage d'arête recommandé dans le tournage de l'acier, exécuté d'une façon automatique par le fabricant de plaquettes alors que, pour l'outil brasé, il est réalisé à la main par l'opérateur.

Carbures métalliques sans revêtement

La dureté des carbures métalliques est d'environ 1 500 à 2 500 HV, elle est très supérieure à celle des aciers rapides non sur carburés (HRC 66 soit environ 865 HV), leur résistance à la flexion est d'environ 800 à 2 200 MPa.

Carbures métalliques avec revêtement

À partir de 1969, un nouveau type de matériau de coupe est apparu. Il s'agit d'un carbure revêtu qui est constitué d'une plaquette en carbure métallique recouverte par un film mince de 3 à 10 μm (3 à 10 millionième de mètre) d'un matériau plus dur de 2 000 à 3 000 HRC. Les couches les plus usuelles sont le carbure de titane, le nitrure de titane, le carbonitride de titane et l'alumine.

Céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques.

La céramique la plus utilisée est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 ; l'alumine a été utilisée d'abord pour l'usinage des fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB; maintenant, il est possible d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV). D'autres céramiques sont également employées :

- les céramiques noires sont des mélanges de Al_2O_3 et de carbure métallique
- le nitrure de silicium Si_3N_4 permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demi à deux fois supérieures à celles des autres céramiques.
- les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leur confèrent une plus grande ténacité et permettent les travaux aux chocs.

Cermets

Cermet est un terme formé de deux syllabes : cer vient de céramique et met de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, ils sont constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrides) liées par un métal, généralement du nickel.

Diamants

- Le diamant naturel est issu de la transformation d'il y a 100 millions d'années, du carbone sous très haute pression (environ 7 GPa) et à température élevée (environ 2 000 °C). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles. C'est le plus dur des matériaux connus ; sa résistance à la compression est nettement supérieure à celles des autres matériaux ; son coefficient de dilatation thermique ($3,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) est plus faible que celui des autres matériaux d'outils, il lui confère d'ailleurs une excellente résistance aux chocs thermiques ; sa conductivité thermique est la plus élevée de tous les matériaux.

- Le diamant synthétique, connu par les matériaux d'outils et ses deux formes :
 - Nitrure de Bore à structure Cubique (CBN) qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
 - Nitrure de Bore à structure Hexagonale de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant.

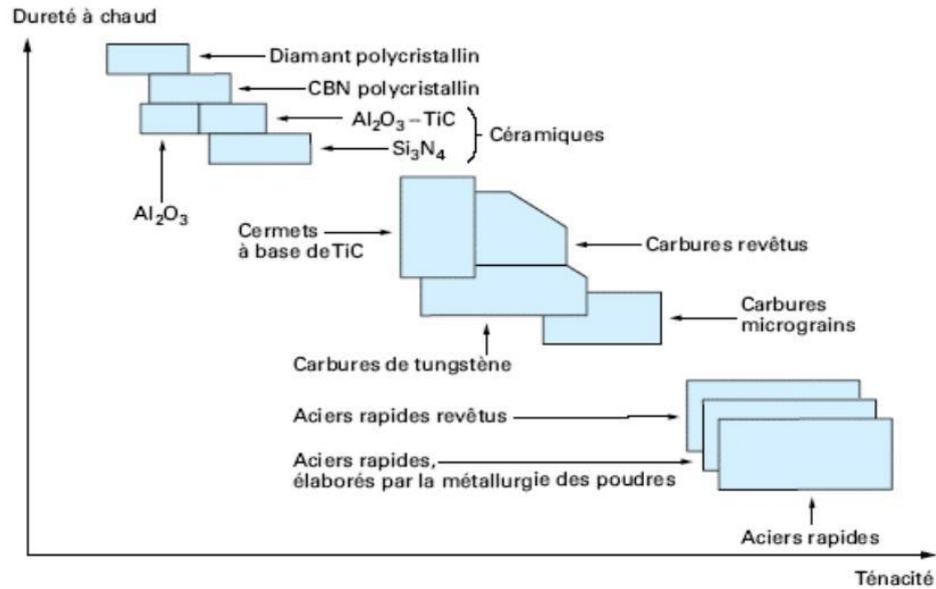


Figure 31 : Les matériaux d'outil et leurs duretés à chaud et ténacités.

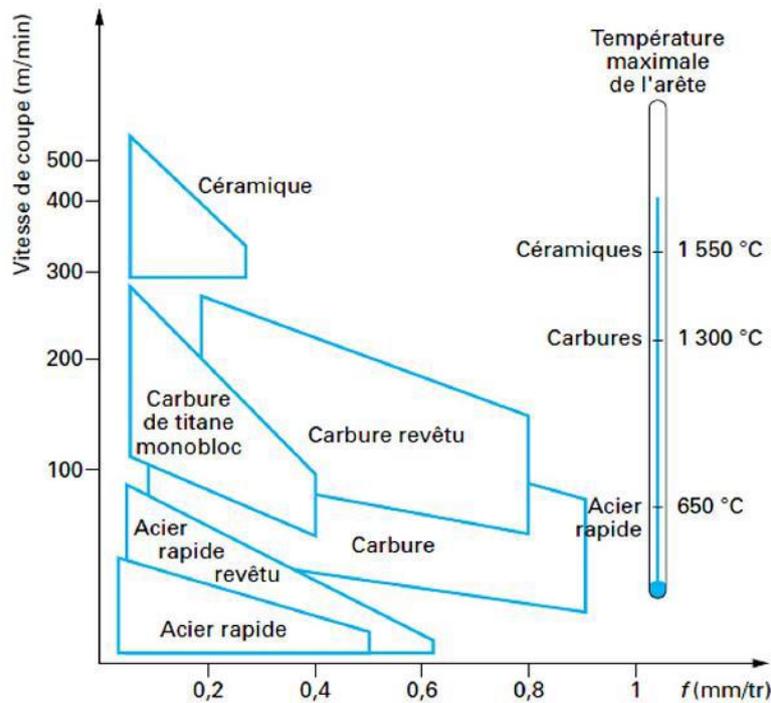


Figure 32 : Les matériaux d'outil et leurs performances à la coupe.

I.9 Fabrication des outils

❖ Outils en aciers rapides

Ils sont pris dans la barre et façonnés par moulage ou par forgeage. Toutefois, les outils en acier rapide sont constitués le plus souvent par une mise, ou pastille en acier rapide extra supérieur, soudée sur le corps (fig. 33). Avant soudage, la pastille doit porter parfaitement sur son siège et s'appuyer contre un talon raccordé au siège par un léger congé. La soudure employée est une poudre à base de tungstène. Elle ne donne de résultats que si les parties à souder sont très propres et si le chauffage est fait en zone réductrice. Pour donner à l'outil une plus grande dureté, on peut souder en bout, électriquement, une partie active en acier rapide de même section que le corps (fig. 33) [4],[3].



Figure 33 : Partie active de l'outil

❖ Outils en Stellites

Sur un corps en acier mi-dur, on dépose une couche de stellite au chalumeau oxyacétylénique (fig. 34). Après ce dépôt, des opérations d'affûtage sont effectuées.

Charge de stellite

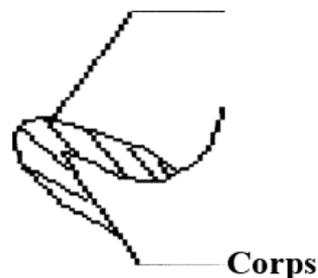


Figure 34 : stellite

❖ Outils en carbures métalliques

La partie active de l'outil est constituée par une pastille ou plaquette de carbure métallique, brasée sur un corps en acier mi-dur, ou amovible - maintenue par bride ou vis (fig. 35) [4],[3].

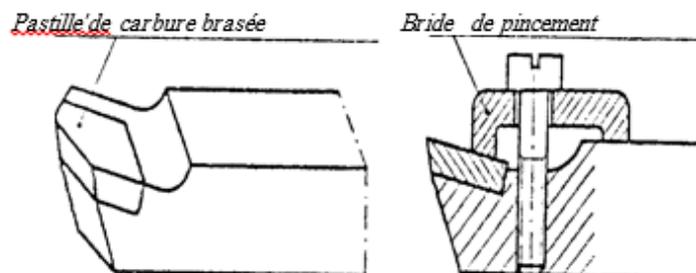


Figure 35 : Plaquette brasée et rapportée avec maintien par bride.

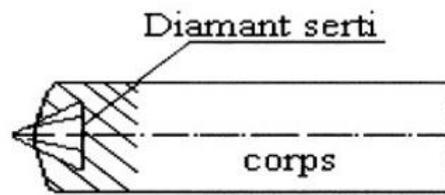


Figure36 : Outil en diamant serti.

Chapitre II

Généralités

II.1 La fabrication mécanique

Ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Pour obtenir une pièce désirée, il faut parfois utiliser successivement différents procédés de fabrication [2].

Les techniques d'assemblage ne font pas partie des procédés de fabrication, elles interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées.

a) Obtention par enlèvement de matière

L'enlèvement de matière consiste à obtenir une forme finale par arrachements de petits morceaux de matière, appelés copeaux. De manière générale, ces procédés sont appelés "usinage par enlèvement de matière". On y distingue : le tournage, le fraisage, la rectification, l'électroérosion, les découpages (l'oxycoupage, le découpage laser, le découpage à jet d'eau, le découpage plasma).

Exemples :

- Perçage : permet de percer une pièce à l'aide d'une perceuse
- Tournage : permet d'obtenir des pièces de révolution (cylindriques) à l'aide d'un tour
- Fraisage : permet d'obtenir des pièces prismatiques (formes carrées) à l'aide d'une fraiseuse.

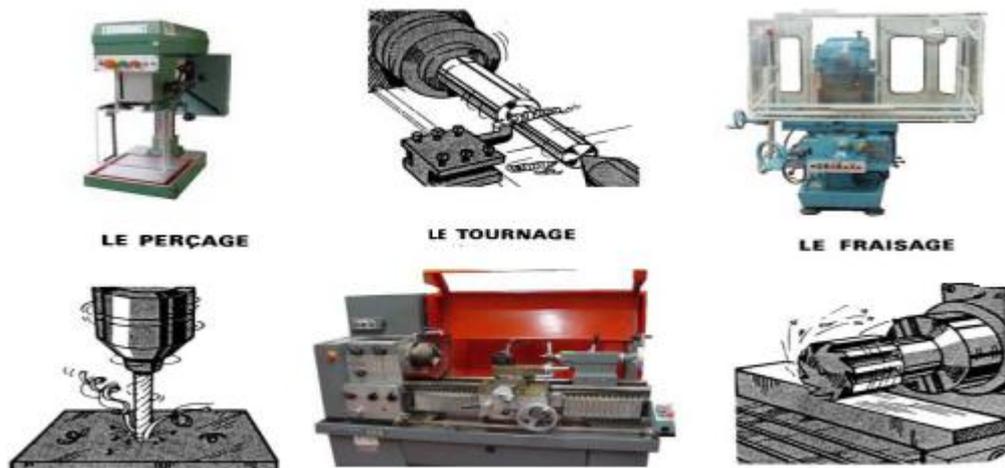


Figure 37 : Perçage , tournage et fraisage

b) Obtention par déformation

La déformation consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée. Parmi les techniques de déformation, il y a : l'estampage, le matriçage, le tréfilage, le forgeage, le laminage, le filage, l'hydroformage, le cintrage, l'emboutissage, le pliage, le thermo pliage, le thermoformage et l'extrusion.

Exemples :

- l'emboutissage est un terme qui définit une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable.

- le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue.



Figure 38 :Exemple de pièce forgée à chaud (vilebrequin).

c) Obtention par fusion

- ✓ Frittage
- ✓ Moulage

Exemples :

- Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce.
- Le moulage permet de réaliser des pièces pleines ou creuses, pouvant présenter des formes très compliquées, en remplissant de métal liquide ou de polymère pâteux une empreinte, appelée moule. On réalise ainsi une sensible économie de matière et on réduit considérablement, voire totalement l'obtention de pièces d'où une économie substantielle (moyennes et grandes séries).

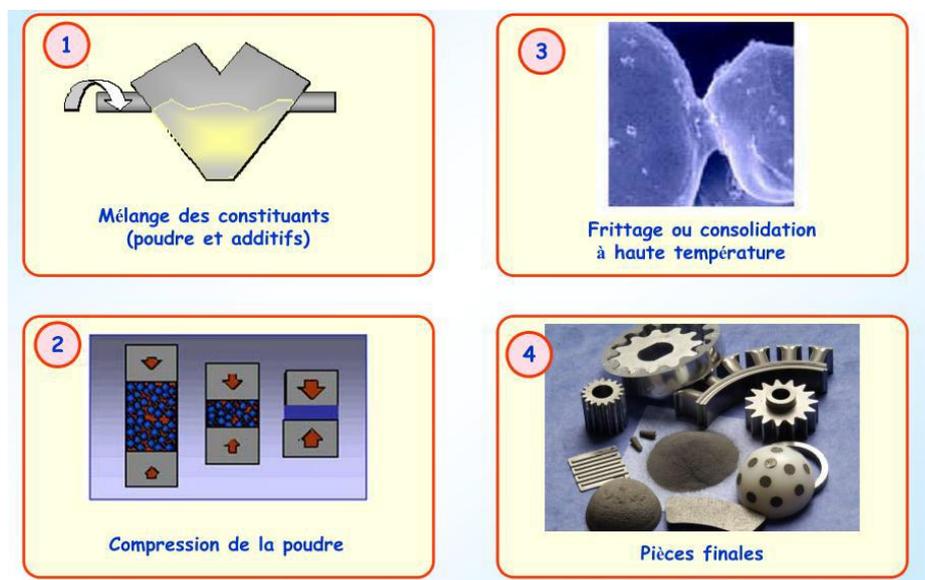


Figure39: Pièces frittées



Figure 40 : Pièces moulées.

d) Obtention par assemblage des systèmes mécaniques

Parmi les techniques d'assemblage, il y a :

- ✓ les techniques d'assemblage démontable telles : le boulonnage, le rivetage, l'agrafage;
- ✓ les techniques d'assemblage non démontable telles : le soudage, le collage.

II.2 Eléments des contacts (Fixes/Mobiles)

Un mécanisme est l'association de plusieurs pièces liées par des contacts physiques qui les rendent totalement ou partiellement solidaires, selon qu'ils autorisent ou non des mouvements relatifs des pièces. Deux surfaces qui se touchent sont dites en contact. Un contact est modélisé par une liaison normalisée (Norme : NF EN 23952/ISO 3952).

En combinant des surfaces de formes simples comme des plans, des cylindres, des sphères, et parfois des cônes, on construit des cas correspondant à des liaisons élémentaires, constituant ainsi les bases de l'établissement de modèles de calculs en mécanique.

Les liaisons se caractérisent par deux fonctions mécaniques de base :

- l'immobilisation relative totale ou partielle des deux pièces adjacentes.
- le guidage ou déplacement d'une pièce par rapport à une autre.

Liaisons mécaniques - Degrés de liberté des liaisons usuelles

Tableau 1 Liaisons mécaniques

0 mobilité														
Liaison encastrement 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		T	R	X	0	0	Y	0	0	Z	0	0
	T	R												
X	0	0												
Y	0	0												
Z	0	0												
1 mobilité														
Liaison pivot d'axe x 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>0</td><td>RX</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		T	R	X	0	RX	Y	0	0	Z	0	0
	T	R												
X	0	RX												
Y	0	0												
Z	0	0												
Liaison glissière d'axe x 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>0</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		T	R	X	TX	0	Y	0	0	Z	0	0
	T	R												
X	TX	0												
Y	0	0												
Z	0	0												
Liaison hélicoïdale d'axe x 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>RX*</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table> <p>$Rx = Tx \cdot 2\pi/p$</p>		T	R	X	TX	RX*	Y	0	0	Z	0	0
	T	R												
X	TX	RX*												
Y	0	0												
Z	0	0												
2 mobilités														
Liaison pivot glissant d'axe x 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>RX</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		T	R	X	TX	RX	Y	0	0	Z	0	0
	T	R												
X	TX	RX												
Y	0	0												
Z	0	0												
Liaison rotule a dotot 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>RY</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>RZ</td></tr> </table>		T	R	X	0	0	Y	0	RY	Z	0	RZ
	T	R												
X	0	0												
Y	0	RY												
Z	0	RZ												
3 mobilités														
Liaison rotule 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>0</td><td>RX</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>RY</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>RZ</td></tr> </table>		T	R	X	0	RX	Y	0	RY	Z	0	RZ
	T	R												
X	0	RX												
Y	0	RY												
Z	0	RZ												
Liaison appui-plan de normale y 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>0</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>RY</td></tr> <tr><td>Z</td><td>TZ</td><td>0</td></tr> </table>		T	R	X	TX	0	Y	0	RY	Z	TZ	0
	T	R												
X	TX	0												
Y	0	RY												
Z	TZ	0												
4 mobilités														
Liaison sphère cylindre (linéaire annulaire) d'axe x 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>RX</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>RY</td></tr> <tr><td>Z</td><td>0</td><td>RZ</td></tr> </table>		T	R	X	TX	RX	Y	0	RY	Z	0	RZ
	T	R												
X	TX	RX												
Y	0	RY												
Z	0	RZ												
Liaison cylindre plan (linéaire rectiligne), de normale y et d'axe x 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>RX</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>RY</td></tr> <tr><td>Z</td><td>TZ</td><td>0</td></tr> </table>		T	R	X	TX	RX	Y	0	RY	Z	TZ	0
	T	R												
X	TX	RX												
Y	0	RY												
Z	TZ	0												
5 mobilités														
Liaison sphère plan (ponctuelle) de normale y 		<table border="1"> <tr><td></td><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>X</td><td>TX</td><td>RX</td></tr> <tr><td>Y</td><td>0</td><td>RY</td></tr> <tr><td>Z</td><td>TZ</td><td>RZ</td></tr> </table>		T	R	X	TX	RX	Y	0	RY	Z	TZ	RZ
	T	R												
X	TX	RX												
Y	0	RY												
Z	TZ	RZ												

Modes pratiques de liaisons

Une liaison mécanique peut être réalisée de deux façons: soit par un obstacle quelconque, soit par adhérence de deux surfaces.

- Liaison par obstacle

Elle est obtenue généralement suite au détail de la forme de la pièce elle-même (figure41) ou à l'aide d'un organe de liaison tel vis, boulon ou autre (figure 42).

- Liaison par adhérence

Cette liaison doit son nom à la surface de contact qui est appelée surface d'adhérence. La déformation élastique assure le serrage les deux pièces (figure43).

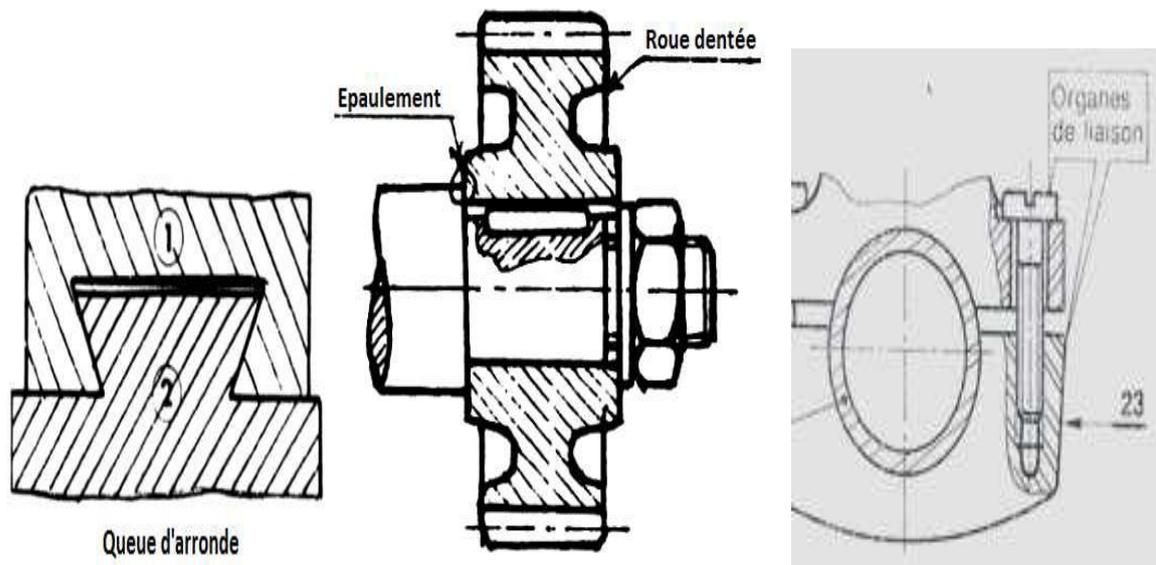


Figure 41: Liaison par obstacle. Figure 42: Liaison par obstacle. Figure 43 : Liaison par adhérence
 (forme de pièce) (organe de liaison)

Caractères des liaisons

A) Liaison complète : lorsque les deux pièces ne peuvent prendre aucun mouvement; en plus des mouvements relatifs de deux pièces l'une par rapport à l'autre qui caractérisent les liaisons, on la classe aussi selon l'aspect technologique du point de vue de la construction mécanique. Les pièces sont solidaires l'une par rapport à l'autre, la liaison est dans ce cas complète, totale ou encastrement. Aucun degré de liberté n'est toléré et les deux pièces sont considérées ou assimilées à une seule pièce (figure 44).

B) Liaison partielle: lorsque les deux pièces peuvent prendre certains mouvements ou au moins un mouvement de l'une par rapport à l'autre, la liaison est dite partielle ou incomplète. Cette liaison est représentée sur la figure 45, obtenue par le détail des formes.

C) Liaison démontable: les deux pièces formant la liaison peuvent être séparées (démontées) sans destruction de pièces et des organes de liaison.

D) Liaison indémontable: les deux pièces formant la liaison ne peuvent plus être séparées ou démontées sans que l'une d'elles au moins soit détériorée ou détruite. La liaison indémontable est appelée aussi liaison permanente ou fixe (figure 46). Ce type de Liaison peut être obtenu par: la soudure, le collage, le rivetage.

E) Liaison élastique: la liaison est dite élastique lorsque la force qui provoque le mouvement est supprimée, la pièce reprend sa position initiale ou une position intermédiaire. La pièce de liaison subit une déformation élastique d'un caoutchouc, d'un ressort ou un autre élément élastique semblable (Figure 47).

F) Liaison rigide: toute liaison ne possédant pas le caractère élastique est dite rigide (figure 48).

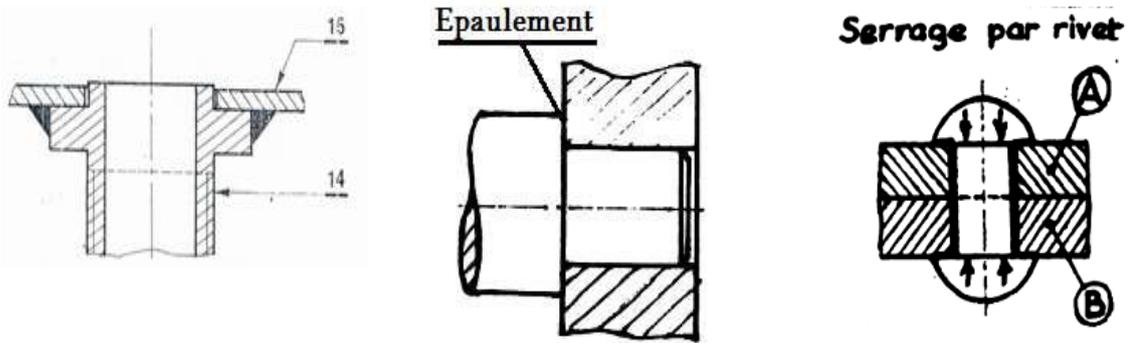


Figure 44 : Liaison complète. Figure 45 : Liaison partielle. Figure 46 : Liaison fixe.

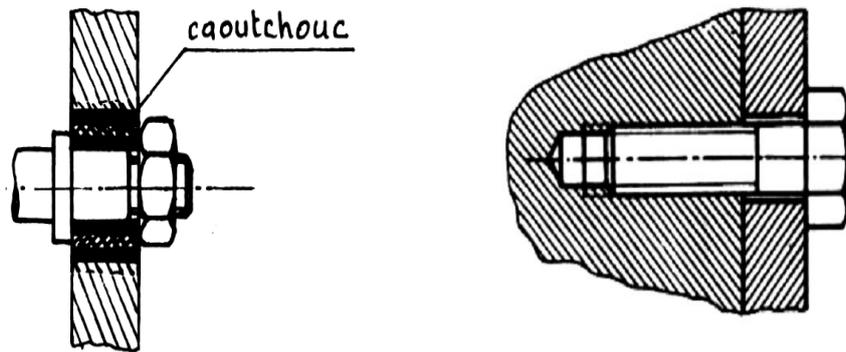


Figure 47: Liaison élastique Figure 48 : Liaison rigide

II.3 Eléments de transmissions de mouvements et puissances

Transmission par adhérence (tableau 2)

La transmission par adhérence repose sur le principe de deux solides (roues) constamment en contact suivant leurs tangentes.

Tableau 2 : transmission par adhérence.

Roue cylindrique		Roue flexible	
Roue conique		Flasque de transmission frontal	
Exemples d'application			

Transmission par obstacles(tableau3)

Pour transmettre une puissance donnée entre deux arbres rapprochés avec un rapport de transmission rigoureusement constant, on utilise des roues dentées qu'on appelle engrenages. Ces engrenages transmettent la puissance demandée par obstacle avec un rendement élevé.

Tableau 3 : transmissions par engrenages.

		Type de dentures*			
		Droite	Hélicoïdale	Chevron	Spirale
Roue à denture extérieure					
Roue à denture intérieure					
* Indication facultative.					
Exemples d'application					
Roue conique					
Secteur denté					
Vis sans fin					
Crémaillère					

Transmission par lien souple (tableau 4)

Les courroies sont des éléments flexibles qui permettent la transmission de puissance entre deux arbres éloignés.

Tableau 4 : transmission par courroies.

Transmission par courroie (symbole général)		Type de courroie			
		Plate	—	Trapézoïdale	
		Ronde		Crantée	
		Liaison avec l'arbre			
Poulies étagées					
	<small>* Indication éventuelle du type de courroie.</small>	<small>* S'il n'y a pas d'ambiguïté, la croix peut être omise.</small>			

Transmission par lien flexible (tableau5)

Les chaînes, comme les courroies trapézoïdales, sont des éléments flexibles qui permettent la transmission de puissance entre deux arbres parallèles éloignés. Elles sont constituées de maillons articulés en acier résistant, ce qui leur permet de supporter des efforts plus élevés que ceux appliqués aux courroies.

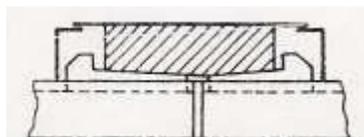
Tableau 5 : transmission par chaîne.

Transmission par chaîne (symbole général)		Type de chaîne	
		Maillons	
		Rouleaux	
		Dents	
	<small>* Indication éventuelle du type de chaîne.</small>		

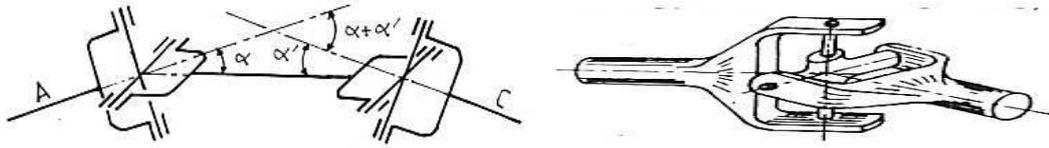
Les accouplements

On appelle accouplement tout appareil destiné à assurer la liaison en rotation entre deux arbres placés bout à bout, avec transmission intégrale de la puissance et sans modification de la vitesse angulaire(ω).

- Accouplements rigides (manchon à coquille simple);



- Accouplements élastiques ;
- Accouplement mobiles (Joint d'Oldham) ;



II.4 Roulements

Constitution des roulements

À quelques exceptions près, les roulements sont constitués des éléments suivants:

- des éléments roulants, billes, rouleaux ou aiguilles ;
- une bague extérieure, dans laquelle est creusée une piste pour guider les éléments roulants
- une bague intérieure, également creusée d'une piste ;
- une cage, destinée à maintenir entre les éléments roulants la distance voulue.

Principaux types de roulements :

- Roulements rigides à billes ;
- Roulements à billes à contact oblique ;
- Roulements à rouleaux ;
- Roulements à rouleaux coniques ;
- Roulements à rotule à rouleaux en forme de tonneau ;
- Roulements à aiguilles ;
- Butées.

Le Tableau(6) présente les différents types de roulements et les charges qui peuvent les supporter. En effet, les roulements sont construits pour supporter soit une charge radiale, ou une charge axiale ou une charge combinée (radiale et axiale).

Tableau 6 : types des roulements.

Roulements	Nomination	Charges supportées par le roulement	Caractéristiques
	Roulement à une rangée de billes à contact radial	Supportent des charges axiales et radiales relativement importantes.	Exige une bonne coaxialité de l'arbre et l'alésage.
	Roulement à deux rangées de billes à contact radial	Supportent des charges radiales importantes et axiales modérées.	Exige une bonne coaxialité de l'arbre et l'alésage.
	Roulement à une rangée de billes à contact oblique	Supportent des charges axiales (dans un seul sens) relativement élevées et des charges radiales modérées.	Ils sont recommandés pour les grandes vitesses de rotation et exige une bonne coaxialité. Ils n'acceptent pas les défauts d'alignement.
	Roulement à deux rangées de billes à contact oblique	Supportent des charges radiales assez importantes et des charges axiales alternées (dans les deux sens).	Les vitesses de rotations admissibles sont inférieures à celles des roulements à une rangée de bille à contact oblique.
	Roulement à rotule sur deux rangées de billes	Supportent des charges radiales moyennes et des charges axiales faibles.	Ils sont utilisés lorsque l'alignement précis des paliers est difficile, ou dans le cas de flexion.
	Roulement à rouleaux coniques	Supportent des charges radiales et axiales (dans un seul sens) relativement importantes	Ils sont utilisés par paire et montés par opposition. Vitesses de rotation élevées et exige une bonne coaxialité. Possibilité de réglage du jeu de fonctionnement.

Roulements	Nomination	Charges supportées par le roulement	Caractéristiques
	Roulement à une rangée de rouleaux cylindriques	Ne supportent que des charges radiales élevées mais aucune charge axiale ou combinée.	Le contact se fait sur une ligne donc la charge radiale à supporter est élevée. Vitesses de rotation élevées et exige une bonne coaxialité.
	Roulement à rotule sur deux rangées de rouleaux cylindriques	Supportent des charges radiales élevées et des charges axiales alternées moyennes.	Frottement élevé impose lubrification à l'huile. Vitesses de rotation moyennes
	Butée à billes	Supportent que des charges axiales relativement importantes.	La vitesse de rotation est faible afin de diminuer la force centrifuge appliquée sur les billes. Ils sont utilisés pour les arbres verticaux, fortement chargés axialement et qui tournent lentement.
	Butée à aiguilles	Supportent que des charges axiales relativement importantes.	Il y a glissement et roulement en même temps. Ils sont sensibles au choc. L'encorement est réduit.
	Roulement à aiguilles avec ou sans bague intérieure	Ne supportent que des charges radiales importantes mais aucune charge axiale ou combinée.	Ils permettent un léger déplacement axial (liberté axiale) de l'arbre par rapport au logement.

II.5 La fabrication Mécano-soudée

Une structure mécano-soudée est un assemblage de pièces métalliques les unes entre les autres, par la technique de la soudure. Utilisée en fabrication unitaire, mais aussi en grande séries, cette technique permet d'assembler des éléments de taille importante pour obtenir une structure de grande envergure.

Souvent utilisée pour des bâtis de machines, des systèmes de manutention, l'intérêt de la réalisation par mécano-soudure réside dans la capacité d'obtention de formes complexes à moindre coût par assemblage de profilés.

Il existe de nombreuses techniques de soudage qu'on peut classer en sous-catégories :

- Le soudage mécanique (soudage à la forge, par ultrasons)
- Le soudage aux gaz (soudage oxyacétylénique)
- Le soudage électrique (soudage à l'arc, soudage laser ...),
- D'autres techniques : explosion, aluminothermie.

II.6 Caractéristiques des matériaux utilisés en mécano-soudage

Deux critères importants sont à retenir : le coût du matériau et sa facilité à être soudé.

Soudabilité

En soudage, le comportement d'un matériau sous l'effet de la chaleur permet de déterminer sa soudabilité, car la plupart des procédés de soudage impliquent l'application locale de chaleur. Il est évident que les éléments à assembler doivent être soudables.

Propriétés thermiques

Trois propriétés thermiques importantes des métaux sont à examiner :

- ✓ Les niveaux de dilatation et de contraction (ou retrait) thermiques influent sur la soudabilité. Plus le métal s'étire ou se raccourcit, plus le risque que des fissures ou des déformations apparaissent, est élevé.
- ✓ Le point de fusion est un facteur déterminant sur la soudabilité d'un métal. Plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée.
- ✓ La conductivité thermique est importante pour déterminer le niveau de préchauffage (si nécessaire) et la quantité de chaleur requise pour le soudage.

Quatre étapes importantes se distinguent lors de l'application d'un procédé de soudage à l'arc :

- 1) Le chauffage ;
- 2) La fusion ;
- 3) La solidification ;
- 4) Le refroidissement.

Quatre principaux facteurs déterminent les effets des opérations de soudage et entrent en considération dans le choix d'un procédé :

1. Quantité de chaleur transférée,
2. Température initiale des pièces,
3. Vitesse de refroidissement du métal,
4. Température atteinte dans la ZAT.

La quantité de chaleur transférée dépend essentiellement du procédé de soudage utilisé : (coefficient de transmission de la chaleur dans la pièce)

- À l'arc submergé 90 à 99% ,
- À l'arc sous protection gazeuse avec fil plein 65 à 85% ,
- À l'arc avec électrode enrobée 50 à 85% ,
- À l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène 20 à 50% .

Calcul du pourcentage de carbone équivalent (%CE)

Ce calcul est nécessaire pour les aciers dont la teneur en carbone est élevée :

$$\%CE = \%C + (\%Mn)/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15$$

Calcul du pourcentage de carbone équivalent composé (% CEC)

Ce calcul tient compte de l'épaisseur des pièces à souder; plus la masse de la pièce est importante, plus il y aura un risque de trempe même pour un acier dont le %CE est faible :

$$\%CEC = \%CE + 0,0254 \times \text{épaisseurs (en cm)}$$

Principales technologies de soudage

Pour obtenir un joint soudé dans les conditions idéales, il doit y avoir entre les pièces soudées une continuité parfaite des :

- ❖ Propriétés mécaniques,
- ❖ Métallurgiques,
- ❖ Physiques.

Pour unir deux surfaces de façon satisfaisante, celles-ci doivent être exemptes d'oxyde, de films organiques ou de gaz absorbés.

L'exécution de la soudure nécessite quatre conditions :

- 1) disposer d'une source d'énergie pour unir les surfaces par pression ou par fusion.
- 2) le procédé doit pouvoir éliminer la contamination des deux surfaces à unir.
- 3) pendant l'opération de soudage, éviter la contamination atmosphérique ou ses effets.
- 4) avoir un contrôle métallurgique de la soudure.

Les procédés de soudage doivent être parfaitement adaptés aux conditions de service exigées d'où la nécessité de choisir judicieusement le procédé ainsi que les conditions dans lesquelles sera exécutée la soudure.

Le soudage le plus répandu dans l'industrie est le soudage électrique. Il existe en plusieurs procédés :

- le soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée,
- le soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz),
- le soudage MIG/MAG (Métal Inerte/Active Gaz),
- le soudage par faisceau d'électrons,
- le soudage par décharge de condensateur,
- le soudage par résistance.

Les techniques de soudage existent :

- ❖ Soudage par pression en phase solide
- ❖ Soudage en phase liquide

II .7 Conception des machines

Traditionnellement, la conception des machines-outils dans l'industrie compte sur l'intuition et l'expérience des ingénieurs pour le choix de leurs configurations structurales ou de leurs arrangements structuraux. Cependant, l'intuition et l'expérience ne garantissent pas toujours un choix optimal. Vu l'absence de méthodologies, le développement de nouvelles machines repose généralement sur certaines solutions déjà commercialisées et exploitées dans l'industrie.

Une machine est un produit fini mécanique capable d'utiliser une source d'énergie à fin d'exécuter un usinage, ou autre tâche répétitive. Elle imprime à un outil, qu'il soit fixe ou mobile, ou tournant, un mouvement permettant d'usiner ou de déformer une pièce ou un ensemble.

La Conception

La conception est la phase créative d'un projet d'ingénierie. Le but premier de la conception est de permettre de créer un système ou un processus répondant à un besoin en tenant compte des contraintes. Le système doit être suffisamment défini pour pouvoir être installé, fabriqué, construit et être fonctionnel, et surtout pour répondre aux besoins.

Les principales étapes de la conception de machines industrielles sont :

- Analyse des spécifications ;
- Etude de faisabilité ;
- Conception logique fonctionnelle ;
- Dimensionnement ;
- Concrétisation (prototypage) ;
- Essais.

Chapitre III

Problématique, données de base et calculs conceptuels

III.1 Problématique, données et schéma de la machine

Le grand développement des matières plastiques, aussi bien dans leur exploitation que dans leurs utilisations, a été constaté durant les périodes où elles étaient à faible prix, suite aux diminutions du prix du pétrole. Ces dernières années, le coût des matières plastiques a augmenté à cause, justement, de l'élévation du prix du pétrole.

Sur un autre volet, l'industrie des plastiques conventionnels est, de nos jours, sous la double menace du réchauffement climatique et de l'environnement pour leur libération de produits toxiques polluants, de déchets non biodégradables, ainsi que la génération de l'intense production de gaz à effet de serre.

Le constat de l'incertitude qui règne sur l'avenir des réserves de pétrole et son prix croissant, l'une des solutions recherchées est le plastique biodégradable comme le fructose. Mais avec l'augmentation de la consommation mondiale annuelle de plastique et les problèmes de pollution qu'elles posent, la solution la plus utilisée de nos jours est le recyclage constituant l'économie dite « circulaire ».

C'est à cette fin que ce projet est inscrit, il s'agit de la conception d'une machine capable de découper les matières plastiques en petit morceaux, avec une attention particulière à son outil. La conception de telle machine exige une étude spécifique de son outil dont les lames coupantes doivent être capables de résister à la corrosion et de cisailer sans déformer et avec un minimum de chocs possible.

La machine est donc composée de lames montées sur un tambour dont les deux extrémités sont supportées par deux roulements. La rotation de l'arbre est assurée par un moteur lié à des organes de transmission de mouvements (courroie, ou bien engrenages) qui ne sont pas dans les limites de cette étude.

L'ensemble arbre + lames est monté entre deux boîtiers métalliques, dénommés chambre de découpage. Le tout est fixé sur une structure assez élevée pour pouvoir installer au-dessous de la machine un convoyeur et pour pouvoir collecter les grains sortants de la machine dans des sacs convenables.

La machine est soigneusement étudiée pour assurer une performance assez élevée, un degré d'universalité est pris en compte ainsi que l'aspect maintenance qui doit être minime.

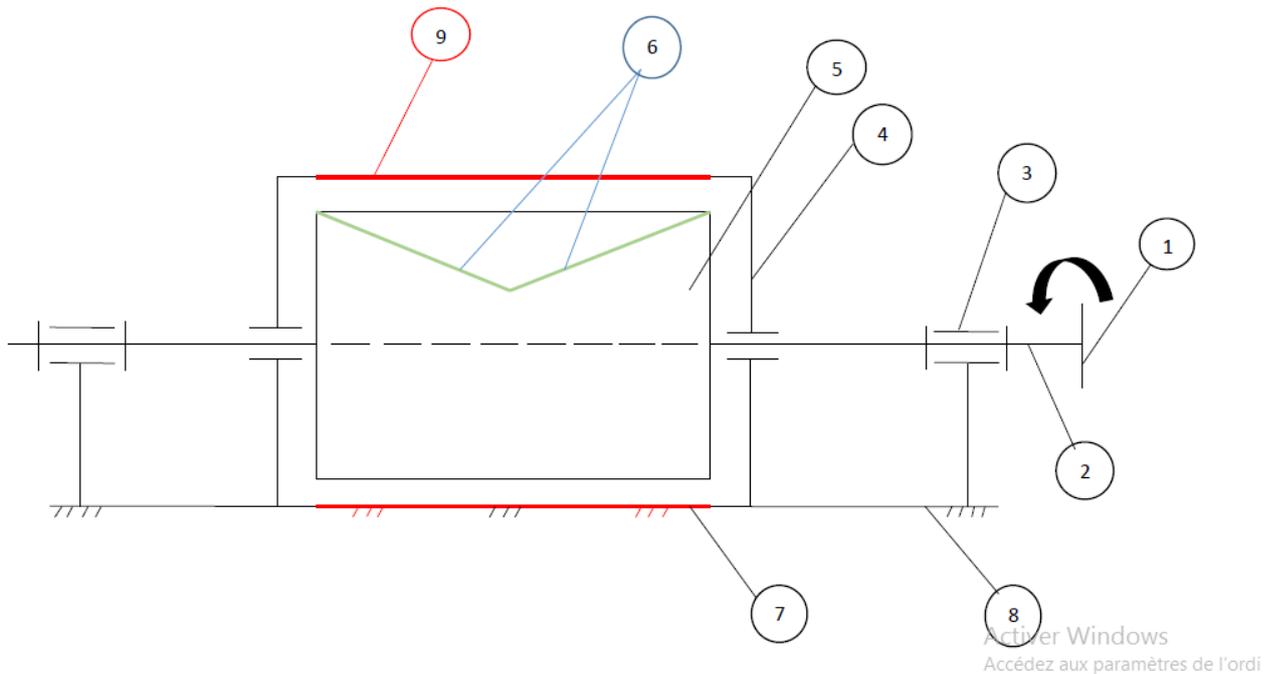


Figure 49 : Schéma cinématique du broyeur

- 1- Organe de transmission de mouvement (poulie/engrenages)
- 2- Arbre (porte tambour)
- 3- Guidage en rotation (palier à semelle NSK)
- 4- Corps (chambre de broyage)
- 5- Tambour porte lames (8 petites lames)
- 6- Lames tournantes (visées sur tambour = 8 lames)
- 7- 9 lames fixes (sur la partie inférieure de la chambre de broyage)
- 8- Structure.

III.2 Données de la matière à broyer, de la machine et de l'outil de broyage

Matières à broyer (préalablement traitées par triage, nettoyage, séchage,...) :

- Thermoplastiques (souples et rigides).
- Epaisseur à couper (1mm à 7mm).
- La lame de coupe en acier au carbone à 12% de Chrome.

Considérations générales sur les contacts:

- Les contacts mécaniques entre pièces sont supposés parfaits, sans jeux.
- Les surfaces fonctionnelles sont géométriquement exactes, sans frottements ni adhérences et sans déformations sous charges.

La modélisation des liaisons est basée sur l'analyse des surfaces de contact entre les groupes cinématiques liés.

III.3 Le cisailage et les forces de cisaillement F_c

Comme convenu, le broyeur sert principalement au recyclage des déchets en plastique en les broyant, après avoir été triés. Le plastique coupé est sollicité en cisaillement. En se basant donc sur les caractéristiques mécaniques du plastique et sur les considérations géométriques de la machine, nous pouvons estimer la puissance nécessaire pour le broyage du plastique.

III.3.1 Le cisailage

Principe : sous l'action de la contrainte imposée par la partie active des lames, il se produit une déformation élastique, puis glissement avec décohésion de la matière (suivant deux directions formant un angle β). La lame poursuivant sa course provoque la rupture du produit à broyer. L'angle β ainsi que la profondeur de décohésion varient suivant la matière du produit à broyer et son état.

L'aspect et le profil de la face cisailée peuvent être améliorés en choisissant un jeu convenable entre les deux lames.

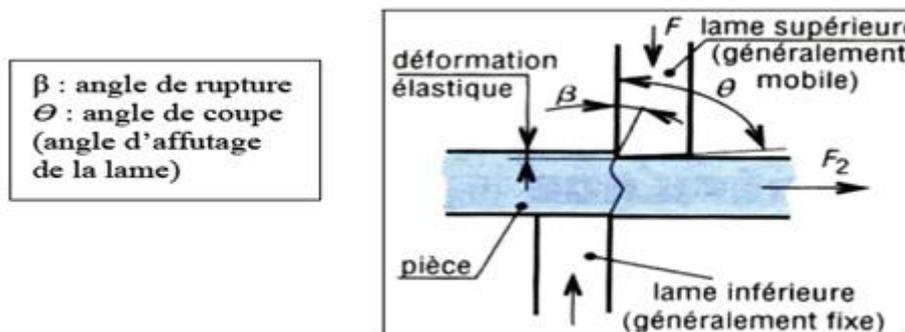


Figure 50 : Cisailage des tôles.

Les principales machines universelles de cisailages sont :

- Cisaille à lame parallèle
- Cisaille à lame oblique.
- Cisaille à lame circulaire

III.3.2 Cisaille à lames parallèles

Le cisailage à lames parallèles ou cisailage dit "droit" permet de cisailier simultanément toute la longueur d'une feuille ou tôle. Pour cette raison, il faut que $L_1 < L_2$ (figure 52). La coupe est généralement rectiligne.

En considérant S_{cis} la section cisailée en mm^2 , formée par e (épaisseur de la feuille ou tôle) et L_1 (longueur cisailée), et R_c la résistance au cisaillement en N/mm^2 ;

la force de cisaillement ou l'effort nécessaire au cisaillement est :

$$F_c = L_1 * e * R_c = S_{cis} * R_c$$

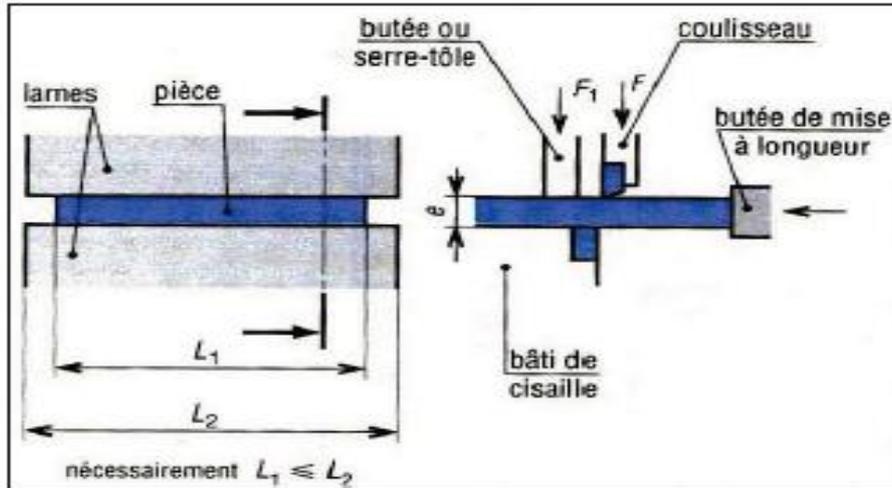


Figure 51 : Cisaille à lames parallèles;

III.3.3 Cisaille à lames obliques

Dans ce cas de figure le cisailage est dit "oblique", la lame supérieure forme un angle α avec la lame inférieure, celui-ci reste constant au cours de la coupe. La lame mobile se déplace entre deux positions extrêmes : le point mort haut PMH et le point mort bas PMB. La longueur découpée pour une course complète de la lame est L pour découper toute la feuille ou tôle, il faut faire progresser la plaque suivant P (figure 53).

L'effort de cisailage est égal à :

$$F_c = \frac{e^2 \tau_r}{2 \tan \alpha}$$

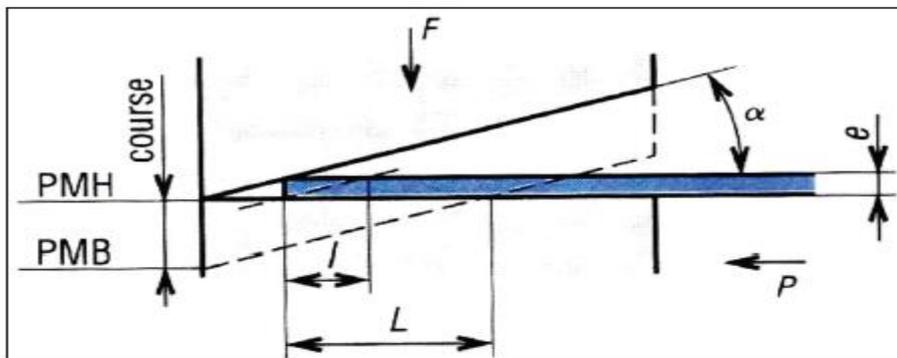


Figure 52 : Cisaille à lames obliques.

Dans ce cas de figure, pour diminuer la force de cisaillement F_c , il faut avoir un angle α grand.

L'autre relation de détermination de la force de cisaillement F_c en [N], en tenant compte de la nature du matériau à cisailier, soit sa contrainte de rupture au cisaillement τ_r en [MPa], ainsi que sa section géométrique S en [mm²], formée de son épaisseur e et de sa longueur L , est :

$$\tau \leq \tau_r \Rightarrow \frac{F_c}{S} \leq \tau_r$$

La plupart de la documentation technique donne la contrainte à la rupture en traction des matériaux; pour obtenir la contrainte de rupture en cisaillement, on peut adopter :

$$\tau_r \approx 0,7 \sigma_r [\text{source Techniques de l'Ingénieur}]$$

Remarque : le choix de la contrainte sert à déterminer, en premier, la force de cisaillement pour calculer après la puissance du moteur qui doit être suffisante afin de cisailier les déchets en plastique quel que soit le type du plastique.

Tableau n°7 : Caractéristiques mécaniques des matériaux plastiques.

		symbole	(1) aspect	densité	températures limites (°C)	R _r (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)	A%	
thermoplastiques	polyéthylène	basse densité	PE-LD	TRL-00	0,92	100	0,5-3	20-40	200-600
		haute densité	PE-HP	TRL-00	0,96	120	2-4	80-180	20-80
	polypropylène		PP	TRP-00	0,91	130	3-5	140-200	250-600
	polychlorure de vinyle	rigide	PVC	TRP-00	1,38	70	4-6	150-350	5-80
		soUPLE		TRP-00	1,20	70	1-3	1-4	150-450
	polystyrène		PS	TRL-00	1,05	80	3-5	200-320	5-75
	ABS*		ABS	TRL-00	1,10	110	1,7-6	200	10-50
	poly (méthacrylate de méthyle)		PMMA	TRP-00	1,20	85	5-8	220-320	4-10
	acétate de cellulose		CA	TRP-00	1,30	90	3-6	80-250	20-50
	polyamide		PA	TRP-00	1,15	160	5-10	90-280	15-300
	polycarbonate		PC	TRP-00	1,20	130	5-7	240	80-120
	polyoxyméthylène		POM	TRL-00	1,40	90	6-7	300	35-75
	polytétrafluoroéthylène		PTFE	00	2,20	+260 -200	2-4	35-80	250-500

Remarque : d'après les données du tableau 7, le polyamide symbole PA a la plus grande résistance à la rupture en traction et donc en cisaillement; de ce fait, les données de base pour le dimensionnement du broyeur est ce type de plastique.

III.4 Calcul de la force de cisaillement

En prenant :

- l'épaisseur maximale du plastique $e=7\text{mm}$;
- la résistance à la rupture maximale du polyamide (PA) $R_r=\sigma_r = 10\text{daN/mm}^2$;
- l'angle d'inclinaison de l'arête $\alpha = 15^\circ$

$$\tau_r \approx 0,7 \sigma_r \Rightarrow \tau_r = 0,7 * 10 = 70 \text{ daN/mm}^2;$$

$$F_c = \frac{e^2 \tau_r}{2 \tan \alpha} = \frac{7^2 * 7}{2 * \tan 15^\circ} = \frac{343}{2 * 0,2679} = \frac{343}{0,5358} = 640,16424 \text{ daN}$$

$$F_c = 640,16 \text{ daN}$$

III.5 Calcul de la fréquence de rotation N du tambour du broyeur (outil)

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi D}$$

En considérant : N - la fréquence de rotation du tambour en [tr/min];

V_c- la vitesse de coupe en [m/min];

D- le diamètre (tambour + lames) en [mm].

En théorie de coupe (usinage), on distingue trois zones de vitesses de coupe distinctes :

- une zone de vitesse correspondant aux vitesses de coupe de l'usinage conventionnel,
- une zone de vitesses de coupe inexploitable (conditions de coupe dégradées),
- une zone de vitesses de coupe correspondant à l'Usinage à Grande Vitesse (UGV).

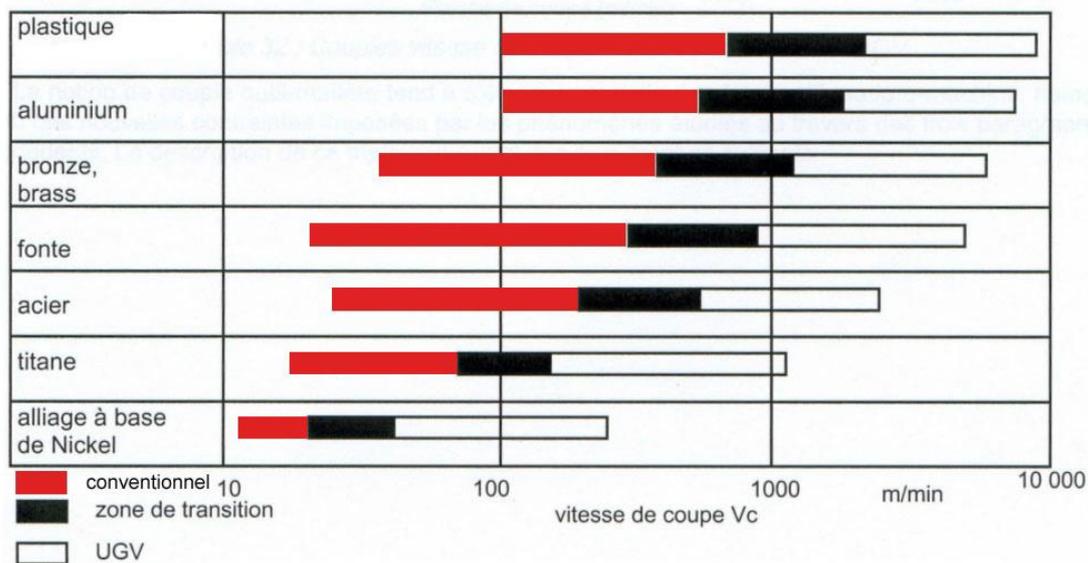


Figure 53 : Vitesses de coupe en fonction des matériaux.

Ainsi, en usinage conventionnel du plastique, la vitesse de coupe varie entre 100 et 900 m/min. Si la vitesse choisie est 300 m/min, la vitesse de rotation du tambour (outil) du broyeur sera alors pour le diamètre de 264 mm :

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi D} = \frac{1000 * 300}{3,14 * 264} = \frac{300000}{828,96} = 361,89 \text{ tr/min}$$

$$N_{\text{adopté}} = 400 \text{ tr/mn}$$

III.6 Calculs des puissances de cisaillement P_c et utile P_a

III.6.1 Puissance de cisaillement

$$P_c = F_c * \frac{V_c}{60}$$

ou : P_c - Puissance de cisaillement en [W]

F_c - Force de cisaillement en [N]

V_c - Vitesse de cisaillement en [m/s]

$$P_c = F_c * \frac{V_c}{60} = 6401,6 * \frac{300}{60} = 32008 \text{ W}$$

$$P_c = 32 \text{ kW}$$

III.6.2 Puissance utile du broyeur (puissance absorbée)

En adoptant un rendement $\mu = 0,85$

$$P_a = \frac{P_c}{\mu} = \frac{32000}{0,85} = 37647 \text{ W}$$

$$P_a = 38 \text{ kW}$$

III.7 Dimensionnement de l'arbre porte tambour

Pour dimensionner un arbre [9], il faut se fixer un des 3 objectifs suivants :

- Résistance (en fatigue, c'est l'ultime objectif),
- Rigidité (pour diminuer la flèche),
- Stabilité (pour augmenter la fréquence de rotation).

Quel que soit le critère de dimensionnement advenant en premier, le diamètre de tout arbre est grandement influencé par les charges et autres couples de torsion, moments fléchissants, ...etc.

Remarque : les charges dépendent directement du positionnement des éléments, recevant ou transmettant ces charges, le long de l'arbre. Il est préférable de positionner les éléments de machine près des liaisons.

A titre indicatif :

- Schéma conceptuel d'un mauvais positionnement des éléments sur un arbre

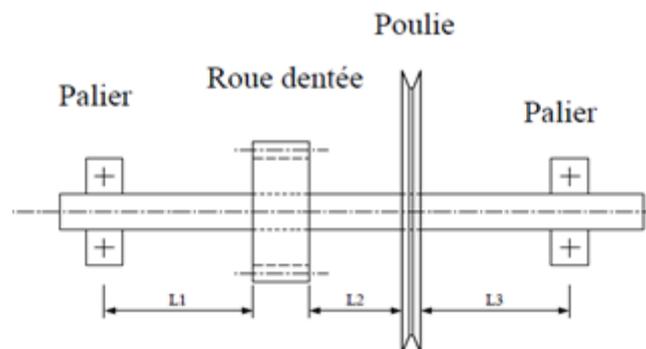
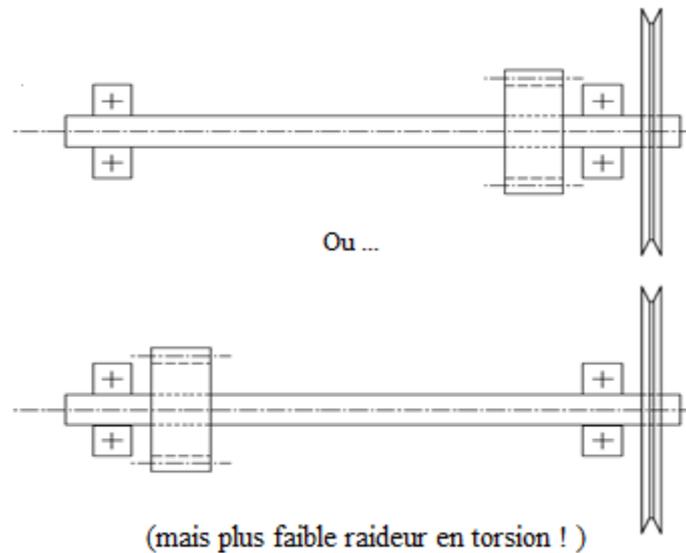
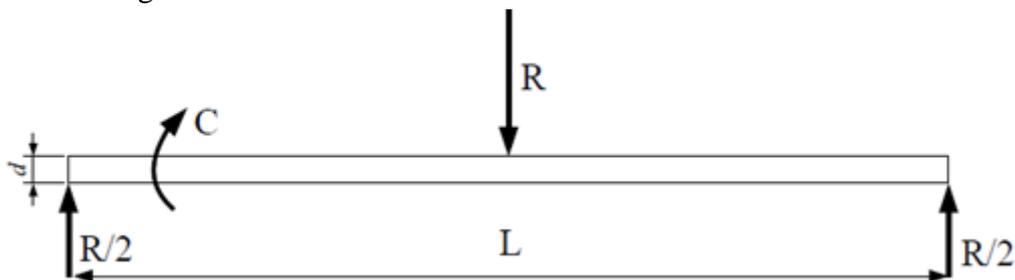


Figure 54 : Schéma d'une mauvaise répartition d'éléments sur un arbre.

- Schémas conceptuels de bons positionnements des éléments sur un arbre

**Figure 55 : Schémas des bonnes répartitions des éléments sur un arbre.**

Dans le cas de notre projet, l'arbre est en appuis sur ses extrémités et la charge est centrale, ce qui donne la configuration suivante :

**Figure 56 : Schéma de répartition du tambour (outil) et des paliers sur l'arbre.**

Selon les normes DIN, la distance maximale L entre les paliers doit être vérifiée par :

$$L < 300 \sqrt{d} \quad [\text{unités en mm}]$$

On peut établir la formule générale donnant le diamètre d d'un arbre plein en fonction de la puissance à transmettre (P en Watt), la fréquence de rotation $N = \text{tr/min}$ et la contrainte admissible en N/mm^2 .

En adoptant :

- Puissance admissible : $P_a = 38 \text{ kW}$
- Fréquence de rotation : $N = 400 \text{ tr/min}$
- Contrainte admissible de l'acier A60(E335) : $\sigma_{\max} = Re = 335 \text{ N/mm}^2 = 335 \text{ MPa} = 33,5 \text{ daN/mm}^2$.

Le diamètre de l'arbre peut être évalué comme suit :

$$\frac{M_i}{\sigma_{max}} < \frac{\pi d^3}{32}$$

$$\Rightarrow d > \sqrt[3]{\frac{32.M_i}{\pi.\sigma_{max}}} \Rightarrow d > \sqrt[3]{\frac{32.10^{16}.60.P.1,225}{2.\pi^2.N.\sigma_{max}}}$$

$$d'oud > 500 \sqrt[3]{\frac{P}{N}} \sqrt[3]{\frac{1}{\sigma_{max}}} \text{ mm}$$

Pour un acier avec une limite de 33,5daN, cela donne : $d > 74,69. \sqrt[3]{\frac{P}{N}}$

$$d > 74,69. \sqrt[3]{\frac{38}{400}} = 34,08 \text{ mm} \approx 40 \text{ mm}$$

III.8 Choix des roulements et des paliers

Le choix d'un roulement dépend de plusieurs facteurs dont :

- La charge
 - La vitesse de rotation
 - La durée de vie
 - La température
 - L'environnement
 - Le défaut d'alignement
 - La taille...
- ✓ Le broyeur doit être conçu avec une performance assez élevée et une maintenance minimale, surtout si l'universalité est envisagée.
- ✓ La conception et le développement de nouvelles machines reposent généralement sur certaines solutions déjà commercialisées et exploitées dans l'industrie.

Ainsi, les paliers à semelle à haute performance peuvent être adoptés comme sièges de roulements avec des roulements à rouleaux sphériques et à alésage conique, de séries moyennes [6].

- * Désignation du roulement : **série 22209K**,
- * Charges dynamiques de base **17000daN**.

Le palier à semelle choisi est constitué de deux parties, il est le fruit des avancées technologiques les plus récentes.

- * Palier à semelle constitué de deux parties avec le corps : **SNN 509**.



Figure 57 : Roulements à rouleaux sphériques à alésage conique [source catalogue NSK]

Performances des roulements choisis, à rouleaux sphériques et à alésage conique

- Supportent des charges radiales et axiales importantes ;
- Conviennent pour de grandes vitesses de rotation ;
- Longue durée et réduction des coûts de maintenance, atteignent des durées de vie jusqu'à 2 fois celle d'un roulement à rouleaux conventionnel.
- Permettent des périodes plus longues de fonctionnement ;
- Coûts de maintenance réduits ;
- Particulièrement résistants à l'usure, même à haute vitesse et sur de longues périodes ;
- Adaptés à une large gamme d'application ;
- Applications où la position exacte du roulement n'est pas connue à l'avance ;
- Application ne permettant pas l'usinage des arbres ;
- Si une finition rectifiée s'avère difficilement réalisable, un état de surface R_a de $3,2\mu\text{m}$ convient, mais avec une légère augmentation du serrage.

Le roulement choisi présente deux types de cages :

- En acier embouti : Haute résistance avec traitement particulier de la surface par nitruration pour une meilleure résistance à l'usure permettant des vitesses de fonctionnement plus élevées ; Guidage des rouleaux à l'aide des brides centrales de la cage, éliminant le besoin d'une bague de guidage, permettant ainsi d'utiliser des rouleaux plus grands, d'augmenter la capacité de charge et de prolonger la durée de vie.
- En laiton usiné : Conception robuste pour une meilleure performance dans les tâches associées à de lourdes charges ou à des charges dynamiques ; Géométrie des poches de la cage et la longueur des doigts procurent un meilleur guidage et une asymétrie contrôlée des rouleaux ; Contours usinés avec grande précision optimisent le débit de lubrifiant aux surfaces de contact des roulements.

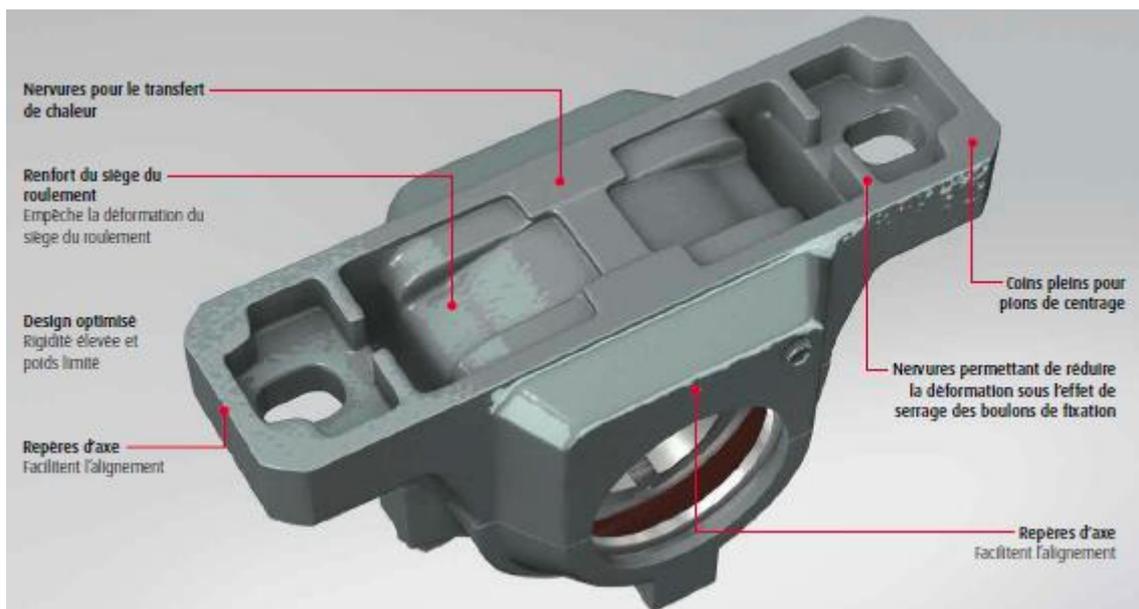
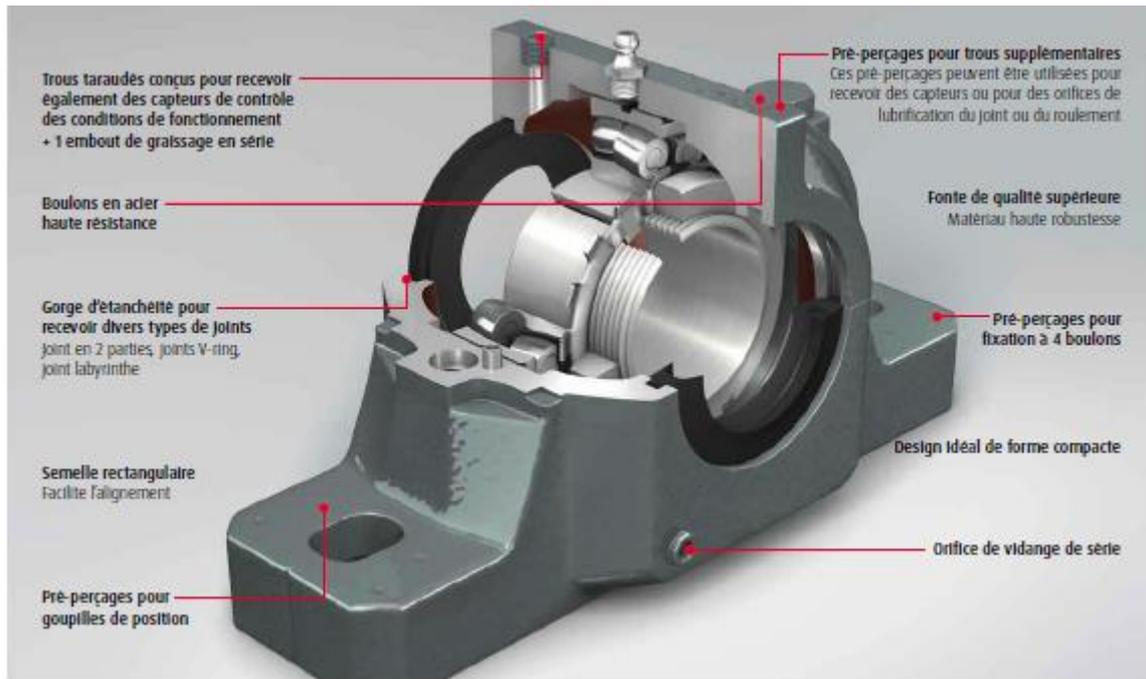


Figure 58 : Palier à semelle en deux parties [source catalogue NSK].

Performance du palier à semelle choisi

- Répondant aux applications les plus contraignantes (exigeantes) ;
- Faciles à monter, à déposer et à entretenir ;
- Semelle carrée et repères d'axes pour faciliter l'alignement ;
- Pré-perçage pour quatre trous de boulons de fixation ;
- Rigidité élevée (déformation du siège du roulement très réduite)
- Nervures de transport de chaleur ;
- Deux options de lubrification : graisse ou huile ;

III.9 Grandeurs géométriques du palier choisi (diamètre arbre 20-65 mm)

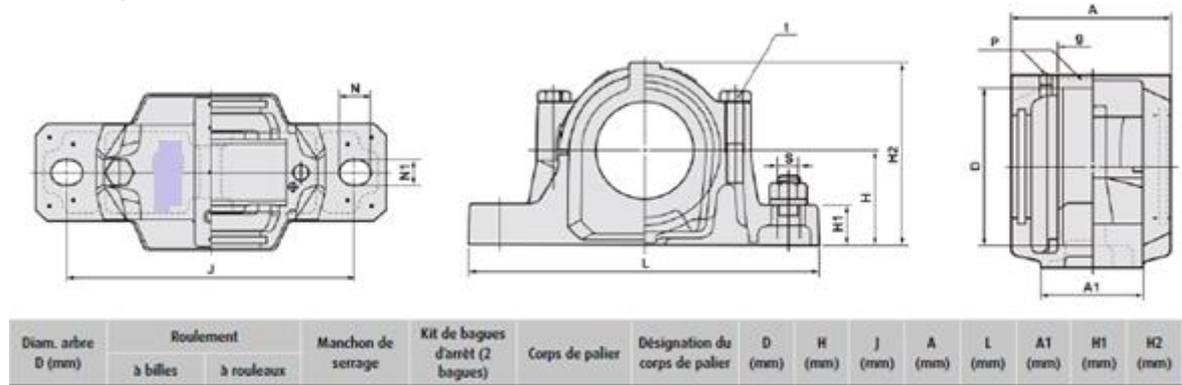


Figure 59 : Grandeurs fonctionnelles du palier [Source catalogue NSK].

III.10 Durée de vie nominale L_h du roulement en heures de fonctionnement

$$L_h = \frac{10^6}{60N} \left(\frac{C}{P} \right)^k$$

ou C : charge dynamique (daN)

P : charge dynamique équivalente (daN)

N : fréquence de rotation (tr/min)

k : (3 pour les roulements à billes, 10/3 pour les roulements à rouleaux)

on a : $C = 17000 \text{ daN}$ [sources catalogues NSK, SKF, SNR, FAG...]

$P = F_c = 640 \text{ daN}$

$k = 10/3$

L'application numérique nous donne : $L_h = 4.38$ $L_h = 4 \text{ Ans.}$

III.11 Jeu entre les lames

Le processus principal du broyeur est le cisaillement, le jeu entre les lames doit être bien défini et respecté. Trois situations se présentent (figure 60) :

- Jeu important : dans ce cas, les déformations sont trop importantes et le cisaillement est remplacé par une flexion, il n'y a donc pas de cisailage ;
- Jeu nul : dans ce cas, les déformations sont faibles, provoquant l'usure des lames ;
- Jeu de fonctionnement idéal : dans la majorité des cas, il est choisi en fonction de l'épaisseur de la matière à travailler et généralement il est pris 1/10 de l'épaisseur à cisailier.

Dans le cas de notre projet, l'épaisseur maximale à cisailier est de 7 mm,

Jeu entre lames = 0,7 mm.

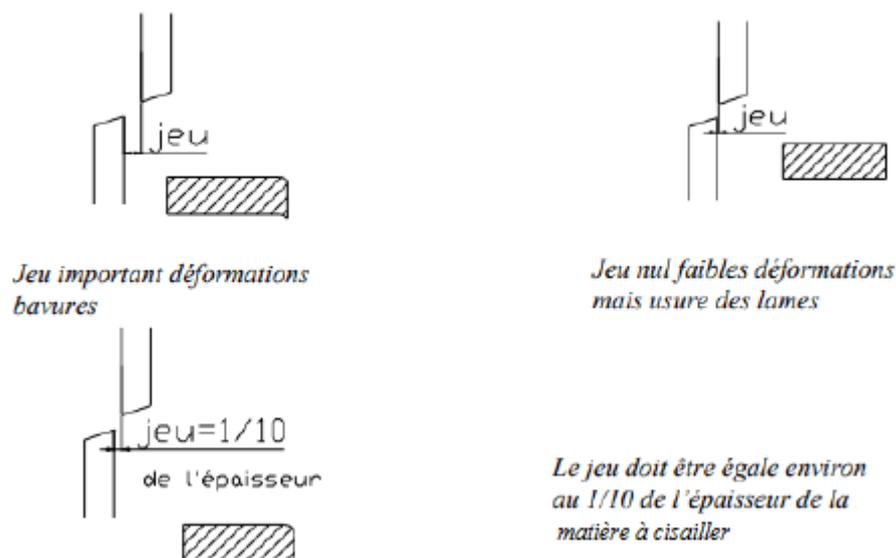


Figure 60 : Jeux entre lames.

III.12 Choix des aciers des principales pièces du broyeur

On distingue deux grandes catégories de matériaux :

- 1) Les matériaux de structure : que nous utilisons principalement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.
- 2) Les matériaux fonctionnels : que nous utilisons pour les propriétés mécaniques et physiques d'une façon générale.

3.12.1 Acier de l'arbre

L'acier choisi pour la fabrication de l'arbre du broyeur est l'acier de construction **E 335**, connu aussi sous la désignation **A60**. Le choix de cet acier est motivé par ses différents usages tels : pièces soumises à de fortes pressions de surface, vis sans fin, pignons, clavettes, axes, bagues,...etc.

Les caractéristiques mécaniques de l'acier E335 sont :

R _é (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	Dureté HRC
335	700	6 - 16	59,4

III.12.2 Acier des lames

L'acier choisi pour la fabrication des lames du broyeur est l'acier **X200Cr12**.

Le choix de cet acier est justifié par son emploi à la fabrication des outils de coupe et des outils de formage à froid tels que : lames de cisailles, filières, matrices, poinçons, outils d'emboutissage, peignes et rouleaux à filer, moules de compactage des poudres métalliques et céramiques, galets de profilage, moules pour résines synthétiques, couteaux circulaires,

cylindres de laminoirs, outils pour extrusion à froid d'alliages légers, outils pour le travail du bois et des matières plastiques,...etc.

Propriétés de l'acier X200Cr12 :acier caractérisé par une bonne stabilité dimensionnelle après traitement thermiqueet padesvaleursderésistanceàlacompressionetàl'usuretrès élevées.

Caractéristiques mécaniques: Duretés 250 HB et environ 64 HRC après traitements thermiques.

Cet acier et les lames fabriquées de cet acier présentent les avantages suivants :

- Son prix est pour l'instant compétitif par rapport à d'autres alliages ;
- Une fois trempée à cœur, la lame présente une très bonne stabilité dimensionnelle, elle ne se déforme pas car elle n'a aucune élasticité;
- La lame présente une bonne résistance aux chocs ;
- La lame s'affûte facilement.

III.12.3 Acierdes boitiers

L'acier choisi pour la fabrication des boitiers du broyeur est l'acier**E 24**.

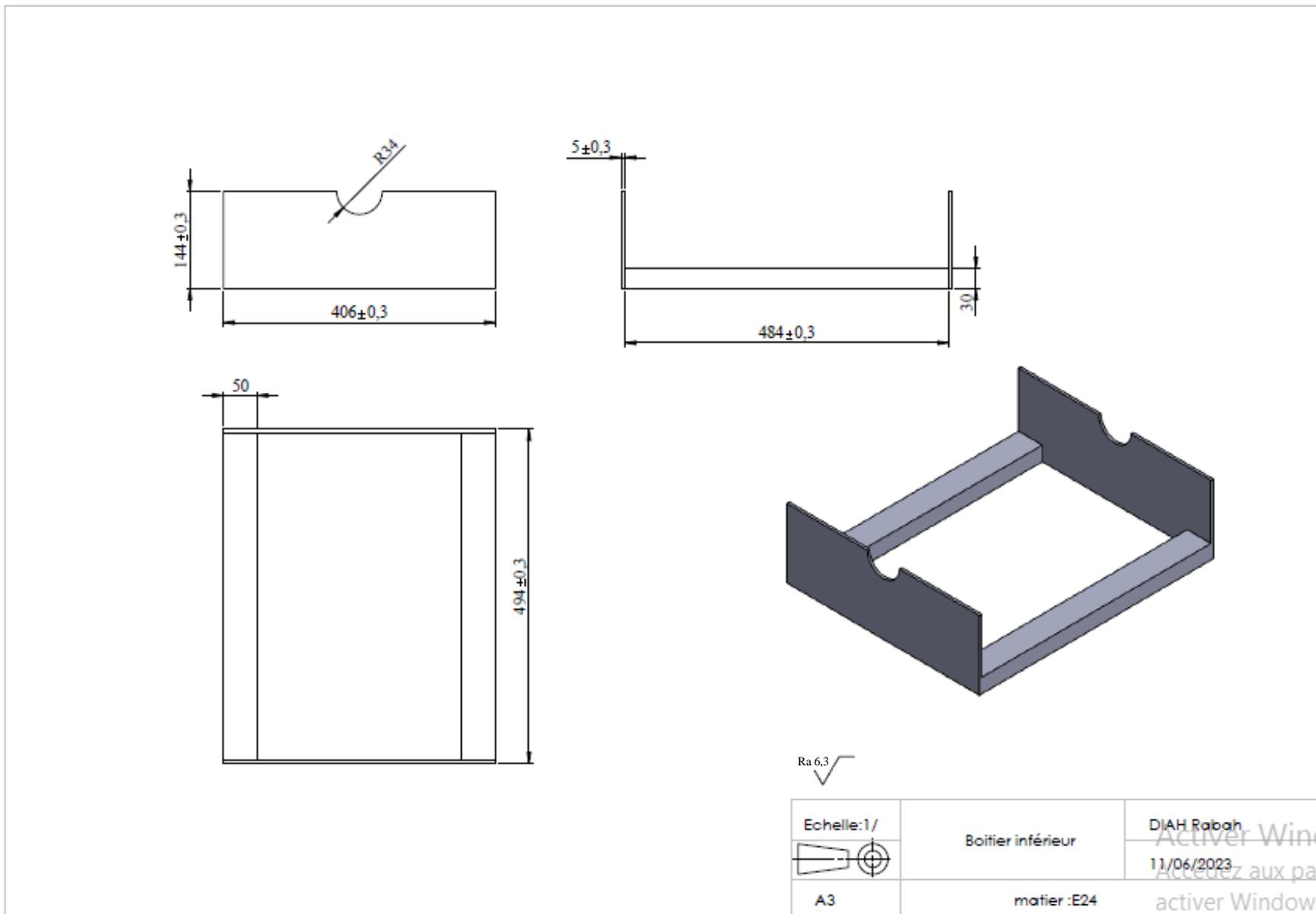
Cet acier présente les avantages suivants :

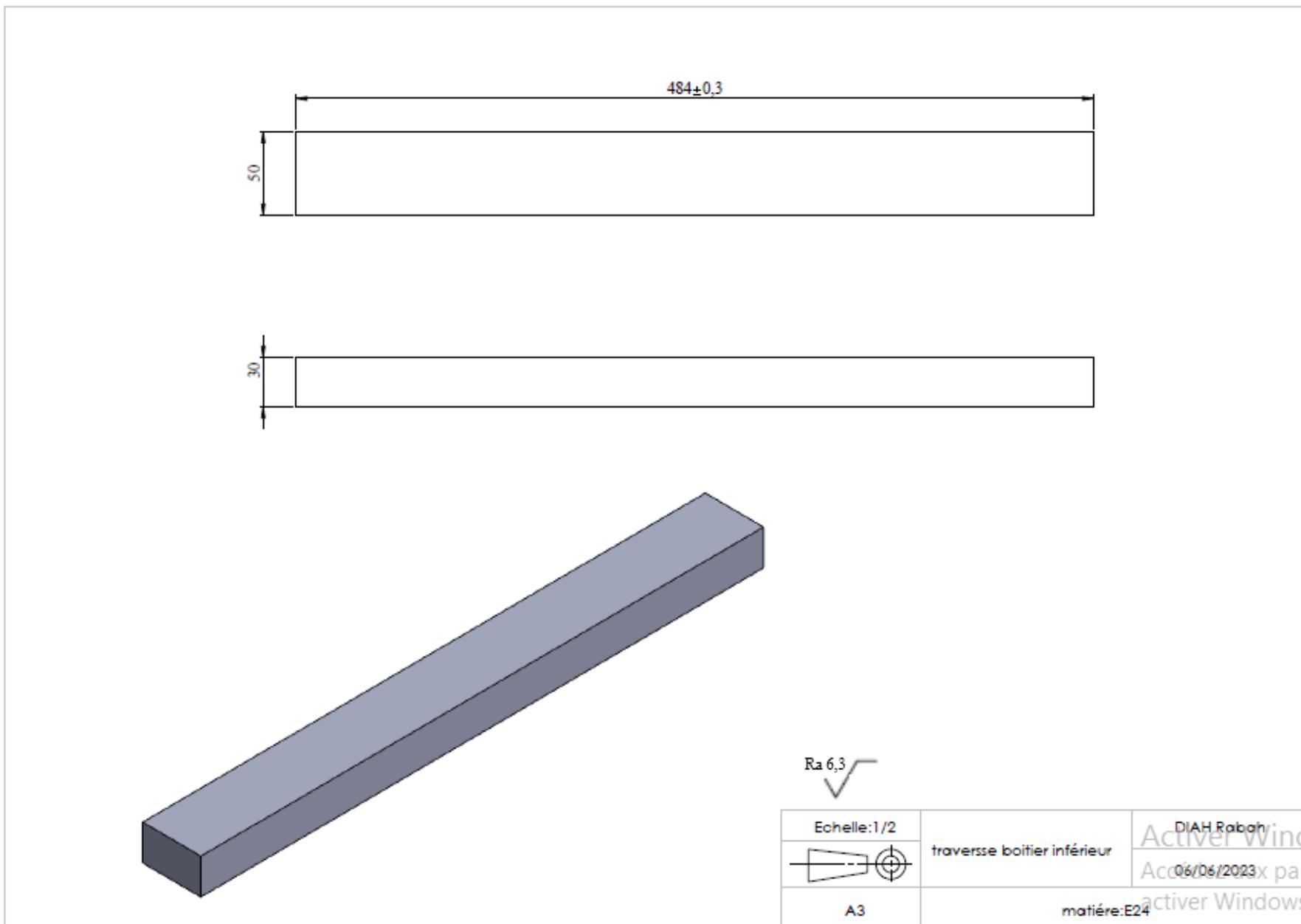
- Usage courant ;
- Aucune garantie de traitement thermique ;
- Résistance mini est R 37 (daN/mm²) et résistance maxi est R 44 (daN/mm²) ;
- Indice de qualité minimum N= R+2,5 A ;
- Bonne soudabilité.

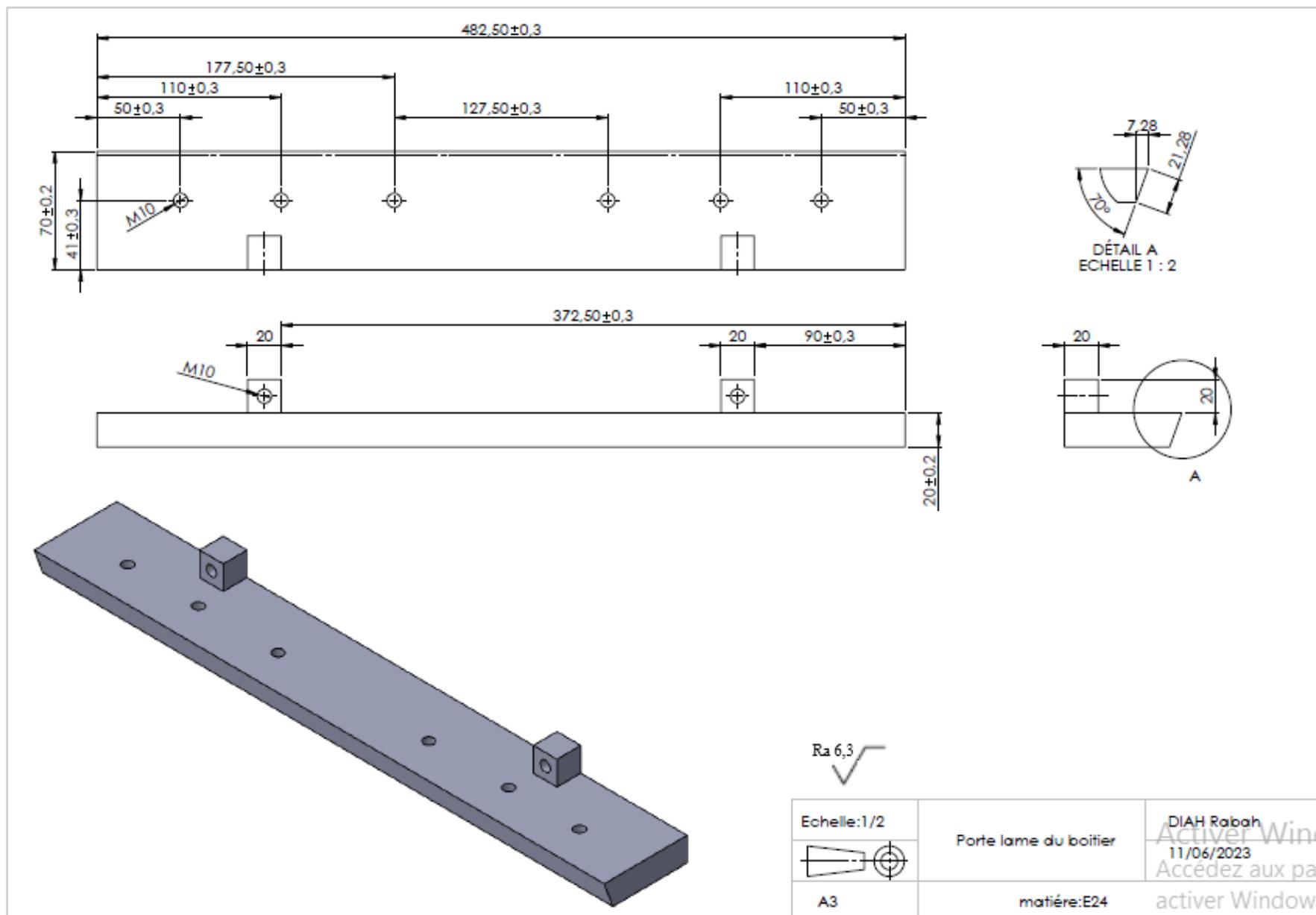
Chapitre IV

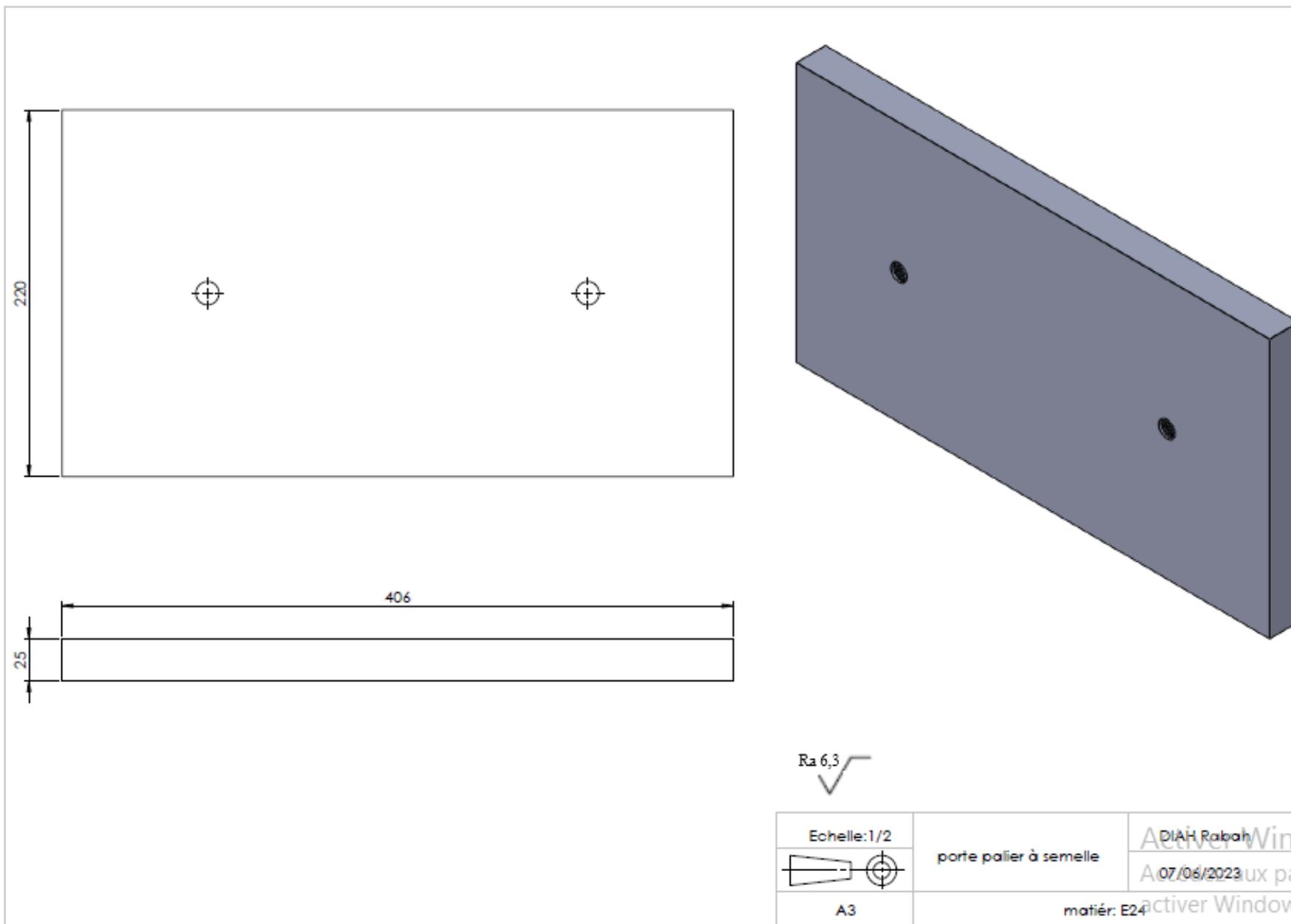
Etude d'usinage

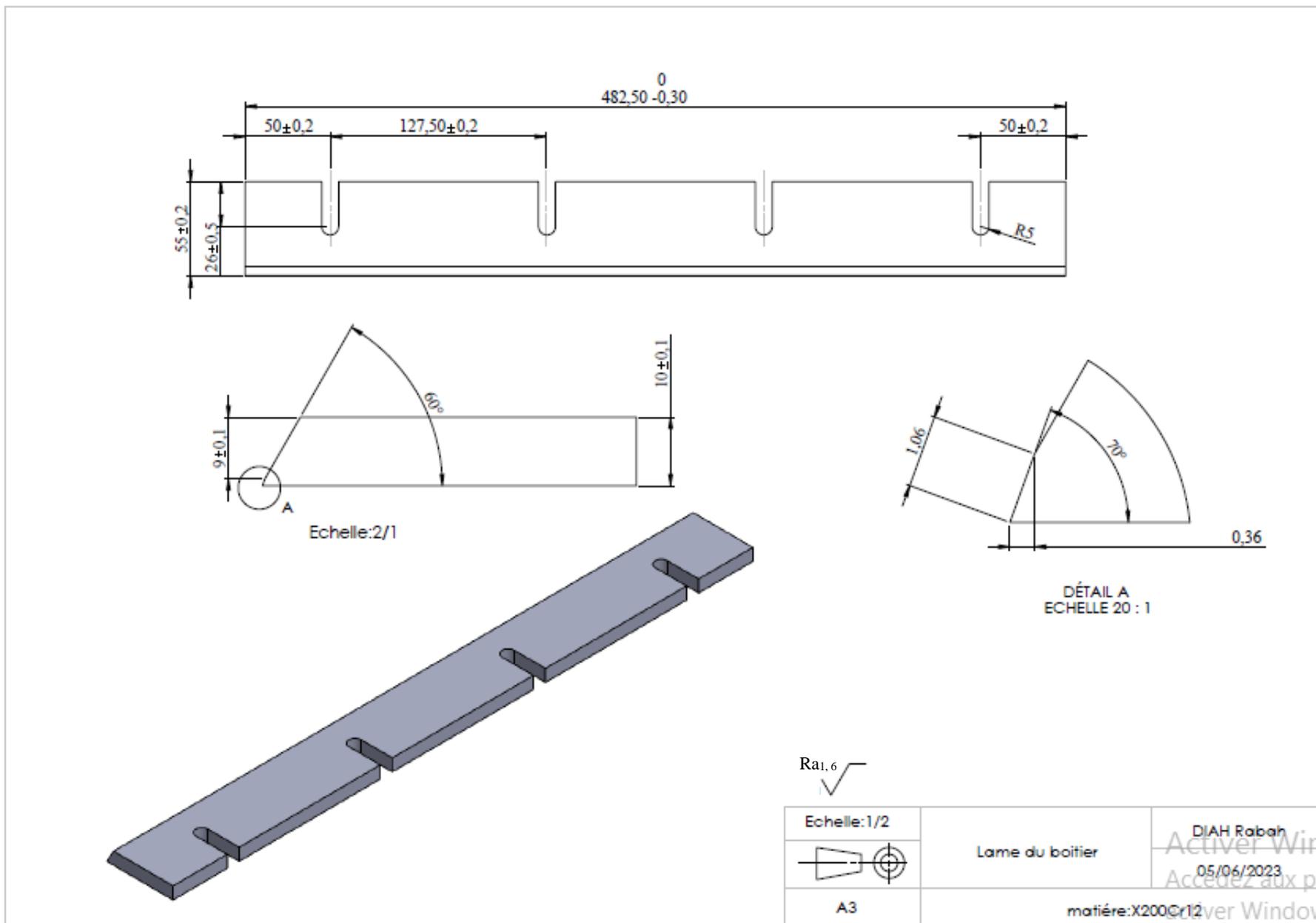
Toute visserie M10 sauf boulon de palier
à semelle : M16 grade8.8

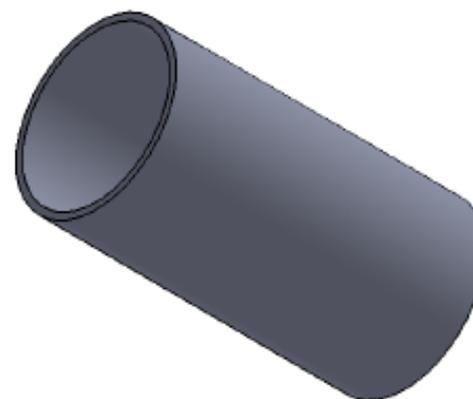
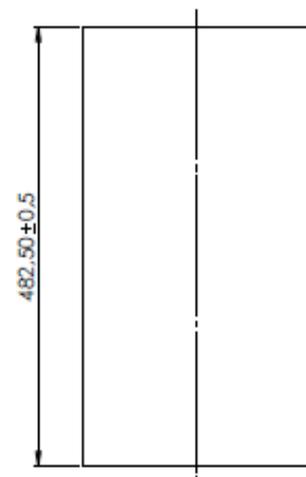
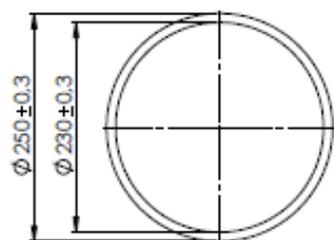








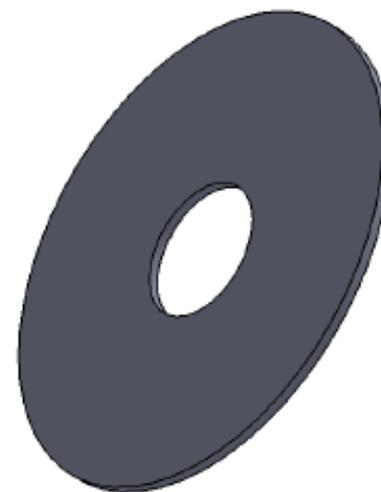
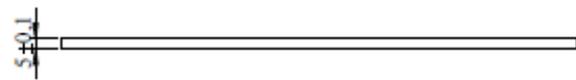
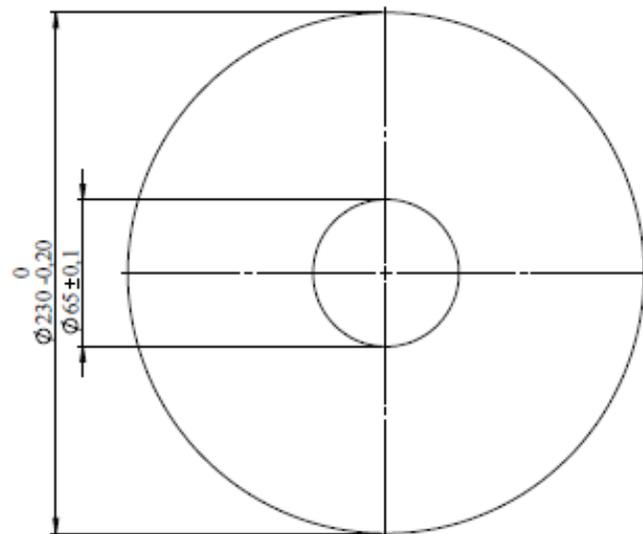




Ra 6,3

Echelle: 1/5	Tambour	DIAH Rabah
		07/06/2023
A3	matière: E24	

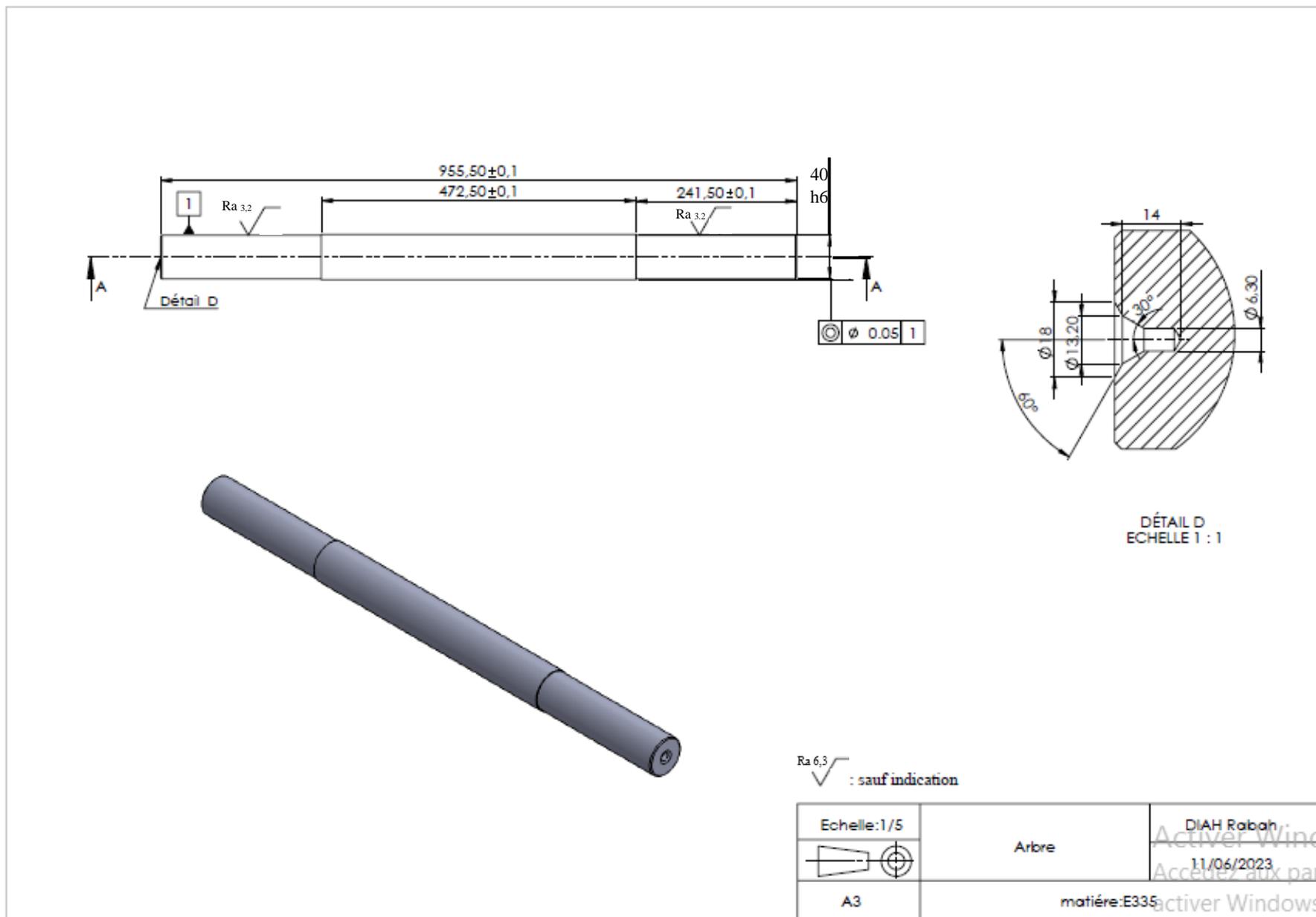
Active Windows
07/06/2023
Accédez aux paramètres de Windows.
activer Windows.

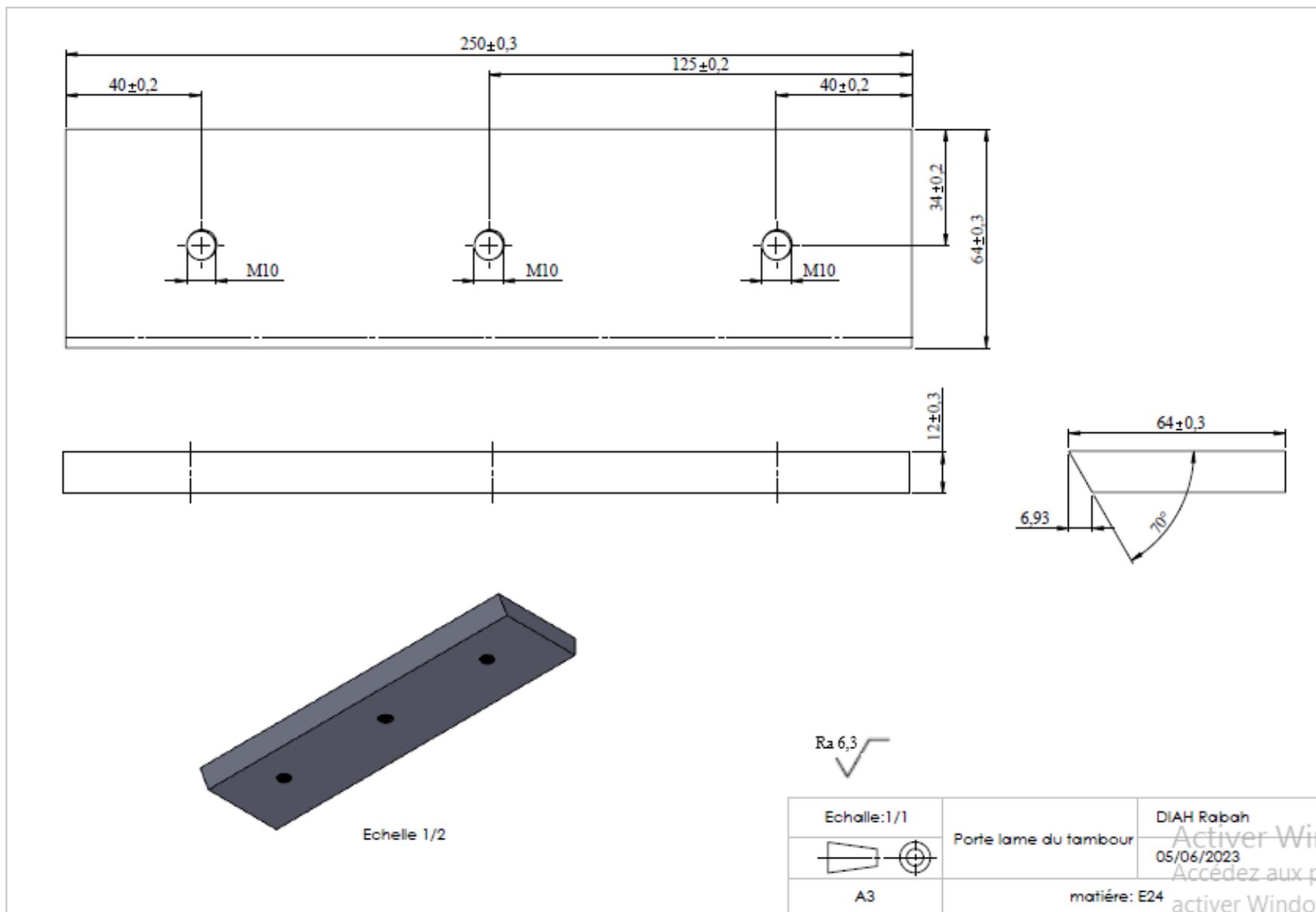


Ra 6,3

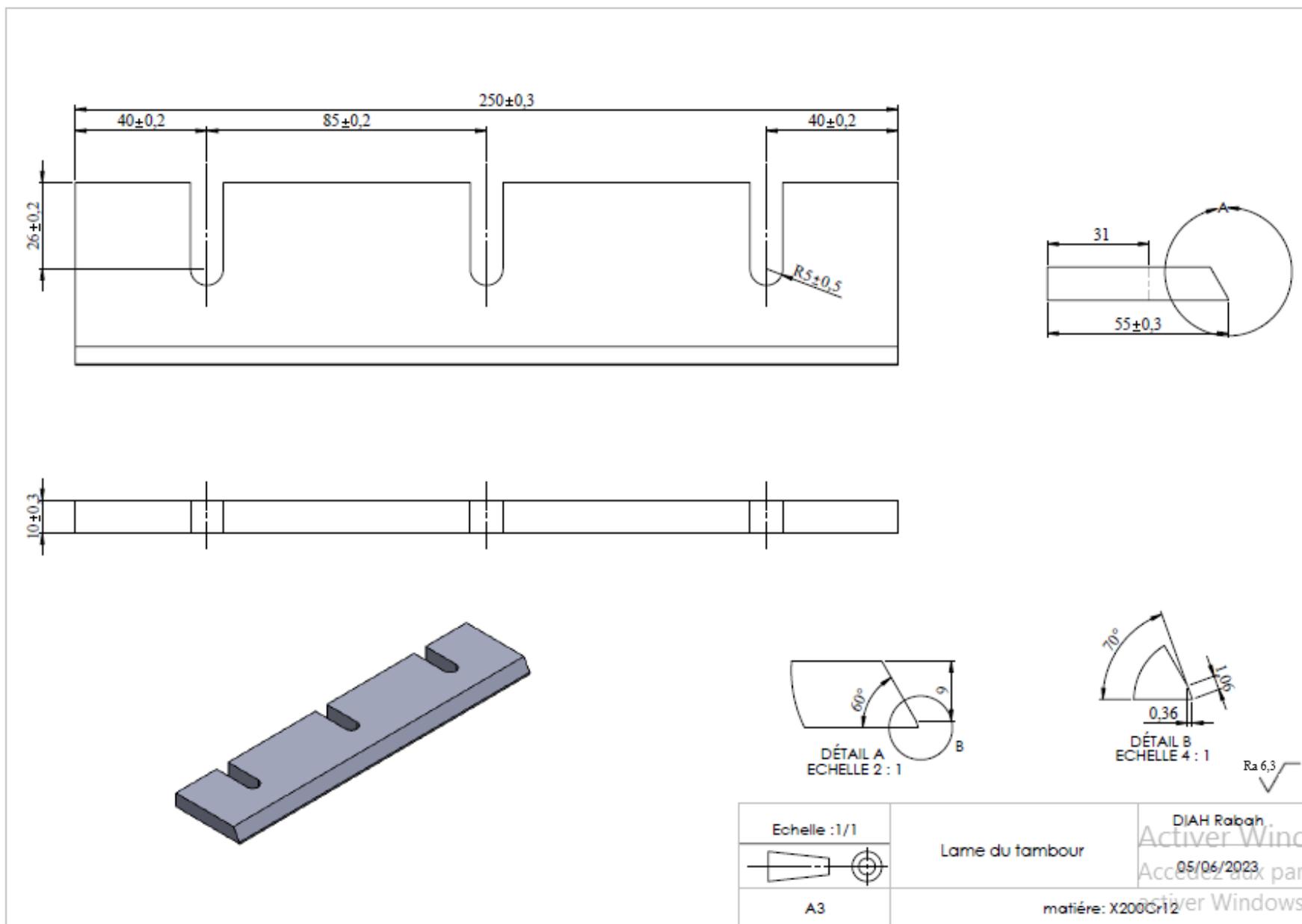
Echelle:1/2	Disque	DIAH Rabah
		11/06/2023
A3	matière:E24	

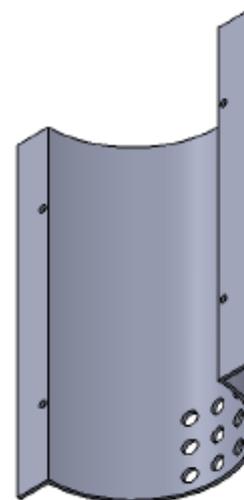
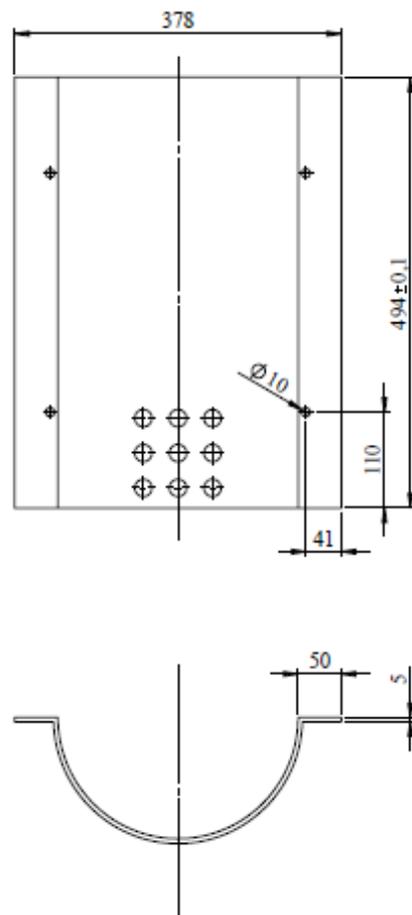
Active Windows
Accédez aux paramètres
pour activer Windows.



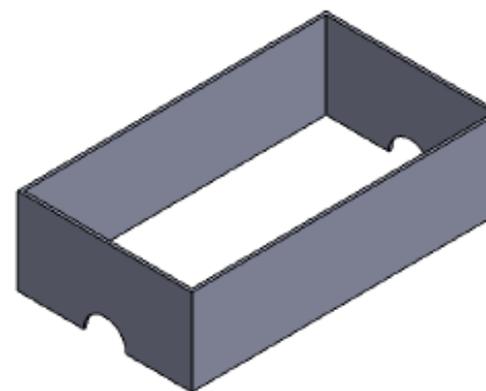
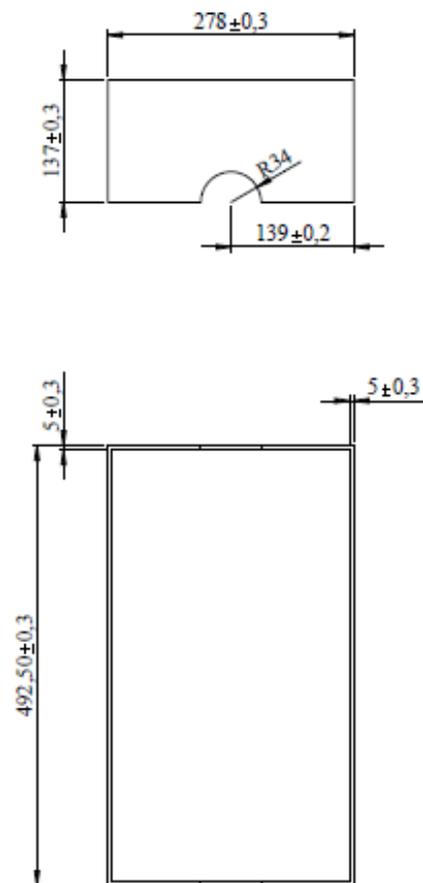


Active Windows
 Accédez aux paramètres de Windows
 active Windows.





Echelle:1/5	Grille de calibrage	DIAH Rabah
		11/06/2023
A3	matière :E24	



Ra 6,3

Echelle:1/2	Boitier supérieur	DIAH Rabah
		11/06/2023
A3	matière:E24	

IV.2 La gamme de montage

Il existe de nombreuses présentations pour ordonner et présenter les opérations de montage et de démontage.

Aucune n'est normalisée. Les informations données sont

L'ordre des opérations

Les pièces en cause

Les consignes et l'outillage

Ce document peut être représenté de différentes façons.

Gamme de démontage Sous forme de tableau Croisé

Gamme de montage en « graphe râteau »

Gamme de montage en organigramme

Gammes de montage et démontage en tableau

Gamme de montage sous forme de graphe

Elle est déterminée à l'aide d'une recherche d'antériorité entre les différentes opérations à effectuer.

On dispose du dessin du produit (Eclaté, perspective...)

- de la nomenclature ou liste des pièces.

- du produit démonté. Il faut identifier les pièces.

Pour notre machine on a trois sous-ensembles : Boitier inferieur

Outil de broyage

Boitier supérieur

Chapitre IV

Rep	Pièces	Contacts	S/ensemble	assemblage	Consignes montage et démontage	outillages
10				Visées sur tambour	Lames de coupe amovibles	Boulons / clés
9						
8	(9)(5)(10)		Outil de broyage	soudure	indémontable	Soudage à l'arcelec.
7				Visé /2 en bas	amovible	
6			Boîtier sup.	soudure	indémontable	Soudage a l'arc elec.
5						
4						
3				Visé sur 2		Vises / clés
2						
1	(2) (4) (11)		Boîtier inf.	soudure	indémontable	Soudage a l'arcelec.

IV .3 Contrats de phases

UBMA	DEPT /mécanique	Instructions	Arbre											
<p>Technical drawing of a shaft. The diameter is indicated as 42 ± 0.5 mm. The length is indicated as 958 ± 0.5 mm. The drawing shows a cylindrical shaft with a centerline and dimension lines.</p>			Matière	E 335		HRC 60								
			Phase	10										
			Sous phase											
			Machine-outil											
N	description des opérations	Montage	outils	Instr.	Mesure	P mm	D mm	L mm	V m/mntr/mn	N mm	a mm/d	a		
1	contrôle du brut L= 958± 0,5 D= 42± 0,5			Réglet Pied à coulisse										

UBMA		DEPART. MECANIQUE		INSTRUCTIONS		Arbre						
						phase 20						
						fraisage centrage des bouts						
						Machi-outil fraiseuse centreuse						
N	OPERATIONS	Montage	outils	Inst. mesures	p mm	D mmm	L mmm	V m/mm	N tr/mm /tr	amm /dent	amm	
1	fraisage les 2 faces mise en L= 955,5±0,1 simultanément Centrage les 2 faces simultent Carbur/metl P18	sur 2 Vé + buté	fraise a surf/dresser D=80 en ARS 2 forets a centrer Avec chanfrein De protection	Réglet jauge de profondeur	1,25 3,15	80 6,3	955,5 14	30 20	200 1000		0,3 0,05	

UBMA		DÉPART.MECANIQUE		INSTRUCTIONS		Arbre							
						Phase 30 tournage							
						Sous phase 301 chariotage 1 ^{er} coté							
						Machine-outil Tour parallele							
						4							
						0							
						0							
						0							
						1							
N	OPERATIONS	Montage	outils	Inst.	Mesure	P	D	L	V	N	a		
1	chariotage en finition 1 ^{er} coté Respectant 0 D=40-0,19 L= 241,5±0,1	Mixte carbure P 10	mandrin + 2 pointes outils a charioté en pied a coulisse	calibre	amachoir	1	40	241	235	1200	0,56		

UBMA		DEPART.MECANIQUE		INSTRUCTIONS		Arbre							
						Sous phase 302 chariotage 2em coté							
						Tour parallèle							
TN	Operations	Montage	Outils	Instr.	Mesure	P mm	D mmmm	L mm	V m/mn	N tr/mn	a mm/tr		
1	charitage en Finition 2é coté Respectant 0 D=40-0,19 L= 241,5±0.1	Mixte mandrin outil + 2 pointes	a charioter en carbure P10	calibre a pied a coulisse	a machoire	1	40	241	235	1200	0,56		

					Lame							
					Phase 20 fraisage							
					Sous Phase 201 surfacage de A							
					Machine-outil fraiseuse verticale							
N	Opérations	Montage	outils	Inst.Mesure	P mm	D mm	L m/mm	V tr/mm	N mm/dent	a		
1	surfacage de A en finition On respectant la cote 10±0,3	Etau	fraise a surfacer et a dresser D=63 en Carbure metal. P 10	Pied a coulisse	2	63		110	550	0,16		

					Lame							
					Sous Phase 203 surfaçage B							
					Machine-outil Fraiseuse verticale							
N	Opérations	montage	Outil	Inst.Mesure	P mm	D mm	L mm	V m/mn	N tr/mn	a mm/dent		
1	surfaçage B en finition assurer L'angle 60° pour avoir La cote= 11,62 Et la cote =5,81 directement	Etau spécial	fraise 2 lèvres en carbure P 10 D= 16	calibre a angle pied a coulisse	5,30	16		18	500	0,15		

Conclusion générale

Cette étude répond à un besoin environnemental, le recyclage des déchets non dégradables. À travers cette étude, on a pu approfondir nos connaissances en conception et construction mécanique.

En outre, l'accomplissement de ce travail a été une occasion pour améliorer des connaissances techniques qui concerne le recyclage en général et celui du plastique en particulier.

La réalisation du broyeur permettra d'améliorer et d'affiner ce projet pour de broyer d'autres matériaux et donner au broyeur un caractère universel.

Références bibliographiques

- [1] D. GERMAIN, Développement d'un modèle d'efforts de coupe intégrant le contact en dépouille : application au tournage de super finition du cuivre Cu-c2. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris Tech, 2011. France, 2011
- [2] C. GRUESCU, F. DEFOURNE, P. QUAEGEBEUR et J. F. ANTOINE, Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU), SEMM (Service Enseignement et Multimédia) / Université Lille1 – France, 2015.
- [3] Usinage par outil coupant, GN-3-PROFA, INSA Institute des sciences appliquées – Lyon – France, 2017.
- [4] R. MOHAMMAD, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage, thèse doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier – Toulouse – France, 2011.
- [5] catalogue STOLZ desmetballestra Broyeur, Granulation, Tamisage WWW.Stolz.fr
- [6] Site NSK Europe : www.nskeurope.fr Site NSK Monde : www.nsk.com
- [7] Guide du dessinateur A. CHEVALLIER
- [8] GUIDE DU TECHNICIEN EN FABRICATIONS MECANIQUES A. CHEVALLIER/J. BOHAN
- [9] Eric Bechet . Calculs des arbres Université de LIEGE